

おもりを用いた工事振動低減工法の概要

地盤環境振動低減工法 GMD 工法

成田 修 英

従来の地盤環境振動対策工法は多大な工期と施工費用を要するため、工事振動対策のための仮設物としての適用は難しい場合が多かった。本稿では、従来困難だった工事仮設としての振動対策を実現する、おもりを用いた低費用・短工期な地盤環境振動低減工法（Ground Mass Dumper 工法、略して GMD 工法と呼ぶ）（以下「本工法」という）の概要・特徴と効果実証実験の結果について紹介する。

キーワード：地盤環境振動，工事振動，振動対策，工事仮設，マスダンパー

1. はじめに

環境省の調査¹⁾によれば、全国の地方公共団体が受理した振動に係る苦情の件数は、近年（1990年代以降）増加傾向にあり、2014年の苦情件数（3,180件）は1995年（2,083件）の約1.5倍もの数に達している。このうち建設工事振動に関する苦情は約6割を占めており、工事振動低減技術のニーズは日増しに高まっていると言える。

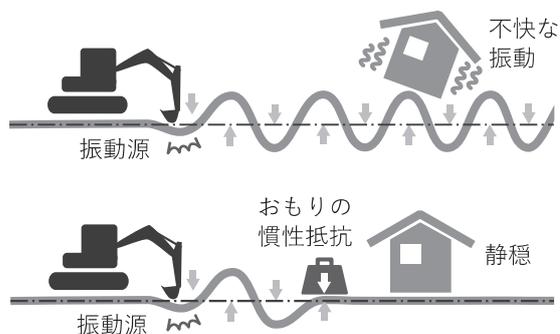
一方、従来の地盤環境振動低減技術は、防振溝・防振壁の構築^{2), 3)}や、振動し辛い、もしくは振動を伝え辛い素材への地盤の置換⁴⁾など大規模な土工事を必要とするものが多く、多大な工期や施工費用を要することから工事振動対策のための仮設物としての実施は難しいケースが多かった。そうした対策を用いなくとも、施工計画上の工夫で工事振動を抑制することは可能であり^{5), 6)}、振動対策に要する費用を最小化するという意味においては、こうした工夫の追求が最も合理的だとは考えられるものの、「振動抑制に配慮した施工計画」と「施工効率の高い施工計画」が両立できるような条件の工事現場は稀であり、多くの場合、振動抑制と短工期はトレードオフの関係となる。つまり、工期の制約がある以上、施工計画上の工夫による振動対策にも限界がある。

本稿で紹介する本工法は、従来困難だった工事仮設としての振動対策を実現する、低費用・短工期の地盤環境振動対策工法である。

2. 技術概要

(1) 概要

図一1に本工法の模式図を、写真一1に本工法の実施例を示す。これら図・写真にある通り、本工法では地表面におもりを設置することで振動低減を行う。地表面上におもりを設置するだけなので、極めて短工期・低コストで実施することが出来、不要になった際にはおもりを撤去するだけで速やかに現状復旧が可能



図一1 本工法の模式図



写真一1 本工法の実施例

である。

本工法の振動低減効果は、簡単に言えば、地表面上のおもりが地盤振動に抵抗して静止し続けようとすることによって生じる（詳細は次節で述べる）。地盤振動に対するおもりの抵抗はおもりの慣性力によって生じるものであるため、基本的におもりの重いほど効果が顕著になる。3章の効果検証実験で示す通り、標準的な低地の地盤条件であれば 1 t/m^2 程度のおもりの重量で、地表面を伝わる周波数 $10 \sim 20\text{ Hz}$ 以上の帯域の振動（加速度）を半減できる。

(2) 原理

簡単のため、工事振動の振動源およびおもりの空間的広がりを見捨て、工事振動を点加振、おもりを質点として考える。このとき、振動源（重機等）・おもり・観測点（近隣住宅等）相互に発生する加振力と応答変位（振動）の関係は、図-2のように表せる。同図の通り、おもりが設置された地盤の波動場は、主要波（おもりの無い地盤（自由地盤）の波）の波動場と、連動波（工事による加振力の働いていない地盤におもりの慣性力のみを作用させた地盤の波）の波動場の重ね合わせとして表される。地表面に設置されたおもりの慣性力は地表に生じている加速度とは逆向きに働くので、振動源から見ておもりの背面側の位置（図-2においておもりの右側）において主要波と連動波は基本的に打ち消し合う（詳しくは下の箇条書き参照）。

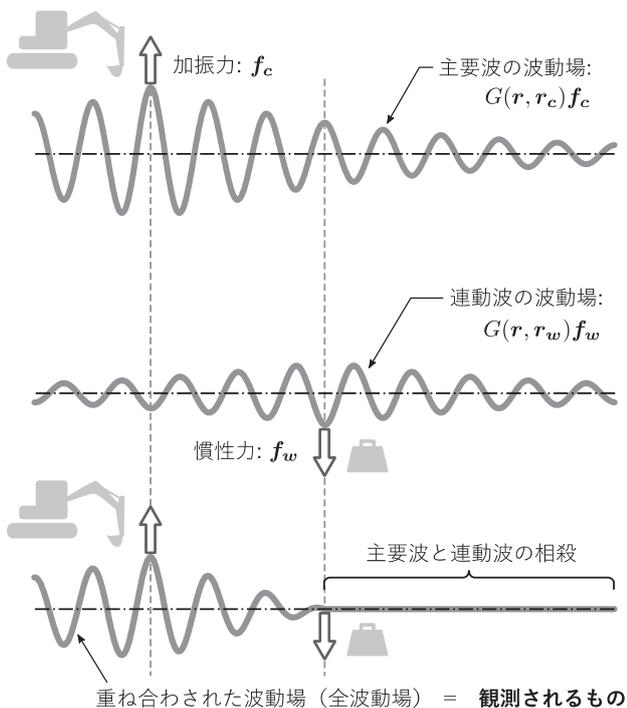
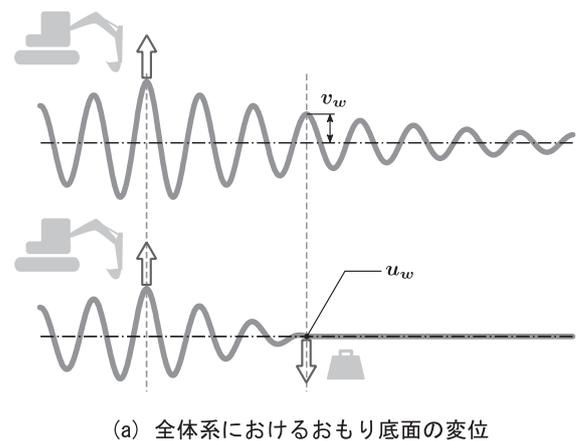


図-2 本工法における弾性波動場の重ね合わせの模式図

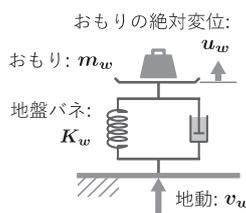
したがって、おもりを地表面に設置することにより、振動が低減されることになる。主要波と連動波の相殺のメカニズムは、振動源、おもり、そして観測点相互の位置関係によって以下4パターンに分類される。

- ①おもりの底面位置:慣性の法則により、常に相殺する。
- ②振動源から見ておもりの背面側の位置: 主要波の波長と連動波の波長が同じであれば、おもり底面と同じ割合で相殺する。逆に言うと、主要波と連動波で波長の近い成分において、顕著な相殺効果が表れる。
- ③振動源とおもりの間の位置: 主要波と連動波の進行方向が逆向きであり、一般に両者が相殺することはない。
- ④おもりにから見て振動源の背面側の位置: 振動源-おもり間の距離と着目している波長, 相互の関係によって相殺する場合としない場合がある。ただし一般に、この位置の連動波は距離減衰の効果が大きく主要波に比して振幅が小さいため、どちらにしろおもりの影響は小さい。

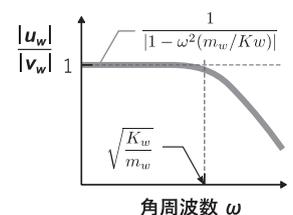
また上記①~④より本工法の効果は、おもり底面位置の振動低減率で概ね代表できることが分かる。ここで、おもり底面位置でのおもりの慣性力と地盤がおもりを押し引きする力の釣り合いを考えると、両者の関係は図-3 (b) のように表せるため、おもりの底面の振動低減率は同図 (c) のようになる。したがって、おもりの背面側まで含めた振動低減効果をおもりの底



(a) 全体系におけるおもり底面の変位



(b) おもり周りの部分



(c) おもり底面の周波数応答

図-3 おもり底面における地盤応答の模式図

面の振動低減率である同図 (c) で代表できるものと考えられるので、工事振動の周波数と本工法の効果の一般的な関係として、以下の2項目も成り立つ。

- ①本工法の効果は周波数が高いほど大きい。
- ②おもりの重量がおもり底面の地盤パネに対して相対的に大きいほど低周波数側から効果が出始める。

(3) 実施手順

本工法では地盤調査結果と工事計画から設置するおもりの重量と配置を決定する。図-4は、その検討フローである。この際の「地盤調査」は地盤の振動特性を把握するための調査であるため、標準貫入試験のみの実施は不適切である(本工法の計画に限れば、標準貫入試験はむしろ不要である)。標準貫入試験だけでなく、PS検層や種々の弾性波探査手法⁷⁾を併用することが推奨される。「効果予測」については、前節の考え方に基づいて、3次元有限要素法や薄層法⁸⁾と有限要素法のハイブリッド計算などを用いる。図-5は、3次元有限要素法を用いた効果予測の例である。

また、施工計画によっては、おもりを設置したい位置と現場の搬出入ゲートを設けたい位置が干渉する、

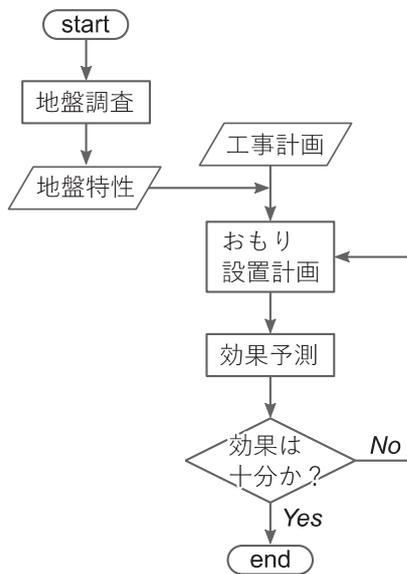
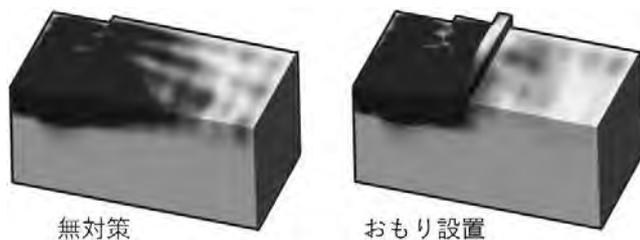


図-4 本工法実施の概略フロー



無対策 おもり設置

*) 色の濃い部分の振動が大きい

図-5 本工法効果予測解析の例

近隣建物と施工区域が近接しすぎていておもりを設置するスペースが無い、などの問題が生じる可能性があるため、施工計画についても十分に留意する必要がある。

3. 効果実証実験

本工法では効果の実証のため、2地点(以下、各実験フィールドをそれぞれサイト-1・サイト-2と呼ぶ)で実験を実施している。それぞれ、以下のような条件の地盤である。

- ①サイト-1: 低地の標準的な剛性の地盤条件
- ②サイト-2: 軟弱な盛土・埋立て土などを表層に有する特に軟弱な地盤条件

本章では、実証実験の結果を通じて、本工法に確かに振動低減効果が認められること、また本工法が前章(1)節・(2)節で述べたような特徴を備えていることを確認する。なお、本章の主旨は今述べた通りであり、誌面の都合もあるため、実験方法・解析方法・データ分析方法等の詳細、および一部実験結果については説明を割愛する。それらの詳細について興味のある読者は、既報文献^{9), 10)}を参照されたい。

(1) 実験概要

実施した実験の配置図を図-6に示す。同図の通り、実験では、おもりの延長方向の中心線上の一方に加振点を設け、他方に加速度計を配置して、おもり設置前と設置後の振動の大きさ(地表面加速度)を比較することによって効果を検証する。振動源としては、加振力の再現性を担保しやすい重錘落下(50kgの鉄の塊を50cmの高さから落下させる)と、より実施

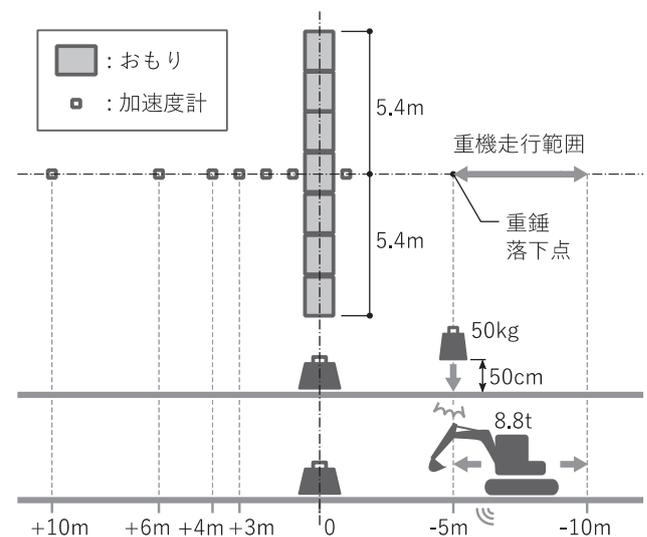


図-6 実験配置図(サイト-1・2とも共通)

表-1 実験ケース

(a) サイト-1

		加振方法	
		重錘落下	重機走行
おもり重量	なし	無-I-1	無-R-1
	0.6 t/m ²	軽-I-1	軽-R-1
	1.2 t/m ²	重-I-1	重-R-1

(b) サイト-2

		加振方法	
		重錘落下	重機走行
おもり重量	なし	無-I-2	無-R-2
	0.6 t/m ²	軽-I-2	軽-R-2
	1.2 t/m ²	重-I-2	重-R-2

■ : 本稿では説明しない

表-2 地盤諸元

(a) サイト-1

地層	下端深さ (m)	V _s (m/s)	V _p (m/s)	密度 (t/m ³)	減衰定数
1	1.7	105	158	1.8	0.10
2	9.7	190	969	1.8	0.05
3	∞	350	1,785	1.8	0.05

(b) サイト-2

地層	下端深さ (m)	V _s (m/s)	V _p (m/s)	密度 (t/m ³)	減衰定数
1	1.6	67	95	1.8	0.05
2	5.6	150	765	1.8	0.05
3	9.1	200	1,020	1.5	0.05
4	∞	300	1,530	1.8	0.05

工の状況に近い重機走行による加振(定格2.9t吊り, 機体重量8.8tのミニクローラークレーンの走行)の2種類を用いる。加振力の種類含め, 実験ケースを表-1にまとめる。また, 各サイトの地盤諸元は表-2の通りである。

(2) 実験および実験シミュレーション解析結果

実験結果においても以下の2点が成り立っていることを確かめる。

- ①重錘落下による振動も, 重機走行による振動も, おもりを設置することで低減できる。
- ②おもりの重量が一定の場合, より地盤剛性の小さい条件の方が, 振動低減効果は大きくなる。また, より地盤剛性の小さい条件の方が, 低周波数側から効果が出始める。

まず実験結果において上記①が成り立っていることを確認する。サイト-1における重錘落下振動(ケース無-I-1・重-I-1)の測定結果を図-7に, 重機

走行振動(ケース無-R-1・重-R-1)の測定結果を図-8に示す。どちらの図においても, 振動の大きさの指標となる縦軸の値(加速度および平均加速度振幅(どう「平均」化しているかは後述))はおもり設置によって大きく低減しており, 「重錘落下による振動も, 重機走行による振動も, おもりを設置することで低減できる」ことが確認できる。なお, 図-8縦軸は, 重機走行時の加振力のばらつきの影響をなるべく小さくするため, 生の加速度のデータに平滑化処理(ここでは, 生データの絶対値をとって0.2秒幅で移動平均をとる処理)を施した値を示している。

次に, サイト-1とサイト-2の結果(ケース軽-I-1・軽-I-2, およびそれらに対応する無対策のケース)を実験シミュレーション結果とも併せて比較し, ②・③が成り立っていることを確認する。地表面加速度波形の実測値を図-9(サイト-1)・図-10(サイト-2)に, これをフーリエ変換し, 実験シミュレーション結果と比較した結果を図-11に示す。図-9, 10を見ると, どちらの実験サイトについてもおもり

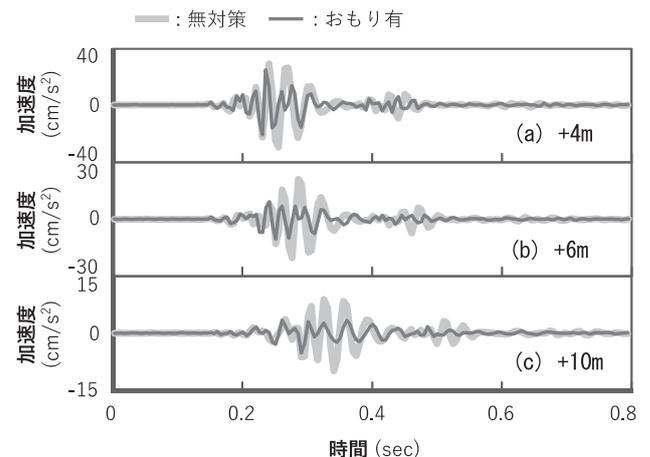


図-7 重錘落下加振: 地表面加速度時刻歴(サイト-1)

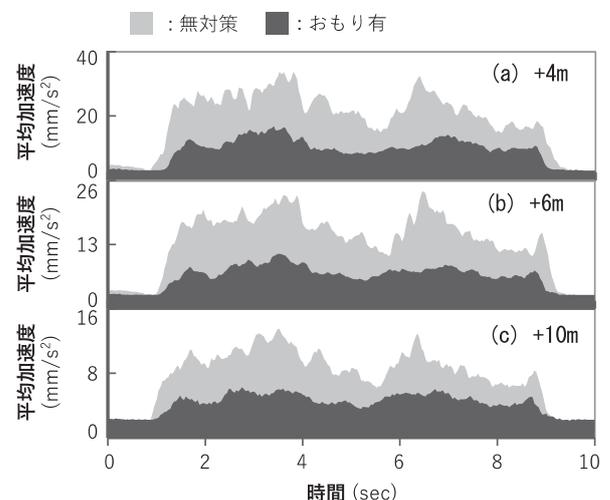


図-8 重機走行加振: 地表面加速度時刻歴(サイト-1)

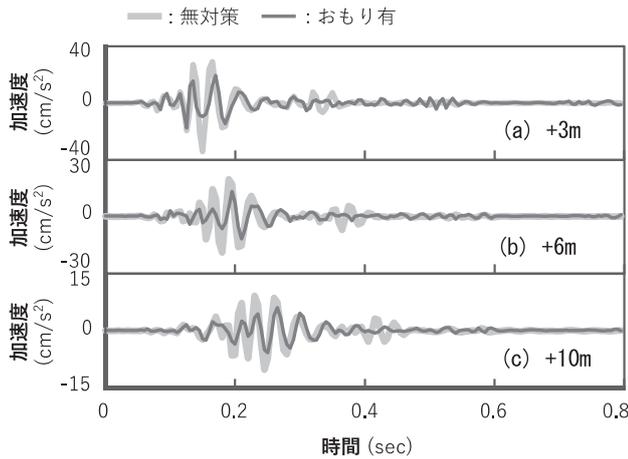


図-9 サイト-1：地表面加速度時刻歴（重錘落下加振）

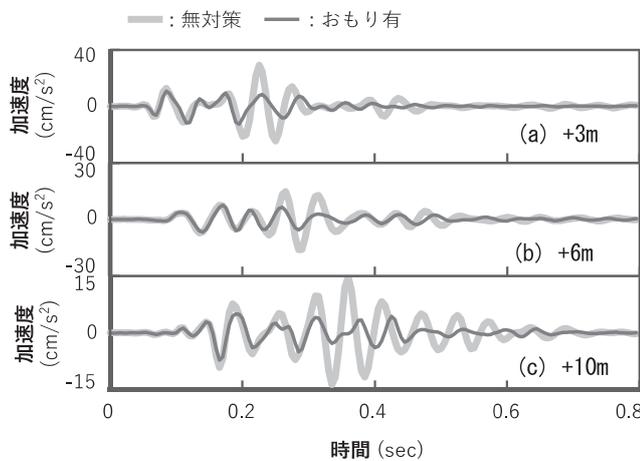


図-10 サイト-2：地表面加速度時刻歴（重錘落下加振）

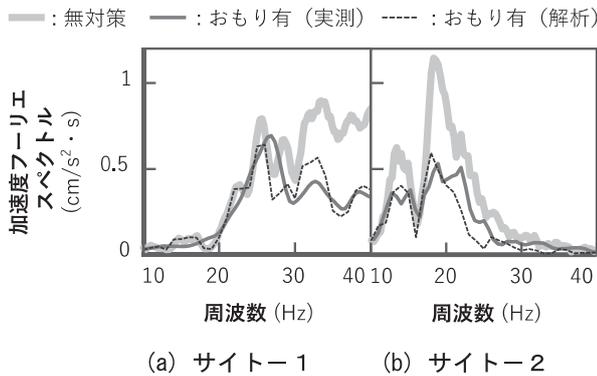


図-11 振動低減効果の周波数特性および実測値とシミュレーション解析の比較（+6m地点）

を設置することで加速度が大きく低減していることが確認できるが、振幅低減の割合を比較すると、より地盤の軟弱なサイト-2（図-10）の方がおもりの効果が大きくなっていることが確認できる。

図-11を見ると、サイト-1では概ね30 Hz以上の周波数帯域でしかおもりの振動低減効果が生じていないのに対し、サイト-2では10数Hz程度のサイト-1に比べ低周波領域からおもりの効果が発揮されており、②が成り立っていることが確認できる。また、シミュレーション解析の結果が実験結果と概ね対応していることから、実験では再現性のあるデータが得られていること、したがって実験から得られた上記の知見も信頼できるものと考えられることが分かる。

4. おわりに

本稿では、本工法の概要と特徴を説明し、実証実験の結果を通じて、本工法が実際にそれらの特徴を備えていることを確認した。

JCMIA

参考文献

- 1) 環境省：振動規制法施行状況調査、<<http://www.env.go.jp/air/sindo/>>（参照2017-1-5）
- 2) 江島淳，吉岡修，坂田英洋，吉村正義：空溝と地中壁による振動遮断効果，土と基礎，28（3），pp.49-55，1980
- 3) 榎原信二，大塚誠，深田久，早川清：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
- 4) 松本元，松村大輔，劉斯宏，井上泰介：土のうを活用した地盤の環境振動低減法，土木学会論文集，No.764 / III-67，pp.235-245，2004
- 5) 環境省：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/>（参照2017-1-5）
- 6) 井上竜太，福田勇輝：バックホウにより発生する地盤振動に関する研究 その1 アームおよびクローラの向きと地盤振動の関係，2016年度日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.405-406，2016
- 7) 地盤工学会編：地盤調査の方法と解説，地盤工学会，pp.79-138，2004
- 8) Tajimi, Hiroshi: A contribution to theoretical prediction of dynamic stiffness of surface foundations, Proc. 7th WCEE, Vol.5, pp.105-112, 1980
- 9) 成田修英，保井美敏，石丸達朗，田口智也，三輪明広，廣野直記，馬場朝之：おもりを用いた地盤環境振動低減工法の現場実験，第50回地盤工学研究発表会，pp.2405-2406，2015
- 10) 成田修英，保井美敏，山本健史，田口智也，石丸達朗，馬場朝之，三輪明広：おもりを用いた工事振動低減工法の効果検証実験，2016年度日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.433-434，2016

【筆者紹介】

成田 修英（なりた のぶひで）
戸田建設技術開発センター
研究員

