

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：92503

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560673

研究課題名(和文)地盤環境振動を地盤上で対策するためのTMD制御に関する研究

研究課題名(英文)Research of TMD control to take measures of the environmental ground vibration.

研究代表者

小林 真人(KOBAYASHI, MASAHIITO)

飛鳥建設株式会社技術研究所・・・室長

研究者番号：60443652

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：研究の目的は建設機械によって発生する地盤環境振動を対策するためのTMD(Tuned Mass Damper)制御に関する設計技術を確立することである。

3次元地盤モデルを用いた振動応答解析と実物大モデルを用いた現場実験からTMD制御による地盤振動の低減効果を検証した。TMD制御による振動低減効果は、TMD質量、減衰、および制御対象振動数とTMDの共振振動数との比に大きく依存することが明らかとなった。このとき、TMD質量は大きく、減衰は小さく、かつ振動数比が1に近いほどTMD制御による振動低減効果が大きくなることも明らかにした。今後は建設機械の加振力とTMD制御パラメータとの関係を詳細に検討する。

研究成果の概要(英文)：A purpose of the studies is to establish a design technology about the TMD (Tuned Mass Damper) control to take measures by ground environment vibration to occur by a construction machine. The reduction effect of the environmental ground vibration by the TMD control was inspected by the vibration response analysis using the three-dimensional ground model and the experiment using the size of the original model. It was revealed that the vibration reduction effect of the TMD control greatly depended on the mass of TMD system, damping of TMD system, and the ratio of frequency for control and the resonance frequency of TMD system. The vibration reduction effect by the TMD control grows big so that the TMD mass is big, the damping is low, and the frequency ratio is almost 1. We will examine the power of the construction machine and the relations with the TMD control parameter.

研究分野：振動制御

キーワード：建設振動 振動対策 TMD

1. 研究開始当初の背景

振動規制法施行状況調査によると振動に係る苦情原因の60%が建設作業であることが示されている。建設作業による振動は4Hzから10Hzに主要な成分を持つことが多く、人体の振動感覚が最も優れている振動数域と合致することや、これらの振動数域で実用的な振動低減対策が無いことが原因である。この様な背景のもと、TMD (Tuned Mass Damper) を地盤上に設置することによる振動制御を着想した。

2. 研究の目的

上記の背景に基づき、本研究では地盤環境振動を対象にTMD制御を可能とすることを目的として以下の項目に着目してTMD設計のための基礎的な検討を行った。

地盤の卓越周波数や伝搬速度など地盤環境振動の性状調査

TMD制御パラメータの解析的検討
実機における効果の検証

3. 研究の方法

地盤の卓越周波数や伝搬速度など地盤環境振動の性状調査

宅地造成現場にて建設重機の稼働による地盤振動を計測した。対象とした地盤は地表から約16m深さまではN値が0~5のシルト質粘土層、16m以深ではN値が10~50の砂質層からなる2層構造となっている。対象とした建設重機と作業はバックホウ0.8m³級によるバケットのあおり、走行、掘削、埋戻し、および最大積載量10tonのダンプトラックによる走行である。建設重機から6m、8m、12m、20mの地点で地表面の振動を同時計測し、計測データから地盤中の伝搬速度、卓越振動数を求めるとともに、伝搬する主要な波動の種類を推定した。

TMD制御パラメータの解析的検討

に示したような表層と支持層からなる2層地盤モデルを作成し、サブストラクチャー法に基づく3次元地盤-構造物連成系解析によって地表面応答を求め、振動低減効果に関するTMD制御パラメータを検討した。ここで、TMDは有限要素法、地盤は薄層要素法で評価した。入力波はの調査で最も振動が大きくなったバックホウ走行時の振動応答を模擬した振幅1tfの正弦波として地盤上に鉛直方向に与えた。検討したパラメータはTMD質量と固有振動の違いによる振動低減効果への影響、加振振動数と振動低減効果の関係、TMDの減衰と振動低減効果の関係である。ただし、TMDは制御対象振動数で共振させることで振動を低減することができるので、地盤上にTMDを設置した場合(以下、振動系)とTMDの質量だけを設置した場合(以下、ブロック)についても比較した。

実機における効果の検証

の検討結果を受けて写真1に示す振動系を試作し振動低減効果を現場実験で検証し

た。振動系は地盤中に打設したコンクリート版(t400×W1500×L5000)を基礎として、防振パネ(1個あたりのパネ定数186N/mm)を介して質量体としてコンクリートブロック(t150×W1000×L5000)を上載した。また、質量による振動低減効果を確認するために基礎上に直接コンクリートブロックを上載した場合(ブロック)についても検討した。振動系、ブロックともに、コンクリートブロックは1枚(1720kg)、2枚(3440kg)、4枚(6830kg)の3とおりとした。振動系については、異なる上載荷重に対して制御対象振動数で共振するように防振パネの数量を調整した。振動源は定期的に大きな振動を与える必要があったので、バックホウ0.8m³級の片側の履帯を浮かせた状態で、もう片方の履帯を回転させ、この時の振動を接地したバケットから地盤へ入力した。履帯の回転速度は最高速度で一定として、この時の加振振動数(=制御対象振動数)は8Hzであった。



写真1 振動系設置の一例(コンクリートブロック2枚)

4. 研究成果

地盤の卓越振動数や伝搬速度などの地盤環境振動の性状調査結果

(1) 対象とした建設重機の稼働による地盤振動の実測結果から地盤中の波動の伝搬速度と卓越振動数を求めた。ここで、伝搬速度は隣り合う測点に到達する波動の時間差を相互相関関数から求め、測点間距離を時間差で除することで求めた。地盤の卓越振動数は測点における加速度のフーリエスペクトルから求めた。表1に調査対象とした建設重機の作業別に伝搬速度、卓越振動数および波長の算出結果を示す。どの作業においても卓越振動数は4Hz~5Hz程度であり、人体の振動感覚が最も優れている振動数域に含まれることが判る。伝搬速度に関しては作業によって多少のばらつきがあるものの、100m/s前後の値となっており比較的軟弱な地盤における振動伝搬状況を再現している。

表1 振動源別の振動伝搬に係る基礎データ

	バックホウ				ダンプ
	アオリ	走行	掘削	埋戻	走行
伝搬速度(m/s)	85.3	113.8	102.4	96.6	102.4
卓越振動数(Hz)	4.7	4.4	4.7	4.2	4.7
波長(m)	19.4	26.0	21.8	22.9	23.8

(2) TMDは地盤表面に設置するため表面波を制御対象とすることが効果的と考えられるので、建設振動が問題となりやすい地盤にお

ける波動の成分が地盤表層を伝搬する表面波が主体であるか、地盤深部を伝搬する実態波が主体であることを明らかにすることは、TMDによる地盤振動制御を検討するうえで重要である。ここでは、振動の距離減衰実測値と既往の地盤振動予測式による減衰カーブを比較することで、伝搬する主要な波動の種類を推定する。図1に振動源からの距離による実測値（振動レベル）と地盤振動予測式による減衰カーブを併記した。減衰カーブは $n=0.5$ （表面波）、 $n=0.75$ （複合波＝表面波と実態波の複合波）について示した。図1は一例として、バックホウバケットのあおりによる比較を示す。図から $n=0.5$ の条件で実測値との対応が良いことから、支持層の上に軟弱な表層があるような2層地盤においては表面波が主体であることが判る。

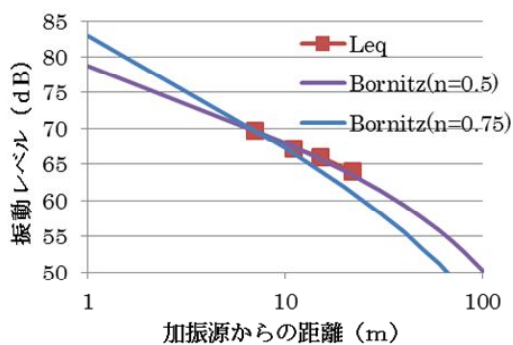


図1 振動の距離減衰実測値と計算値の比較

TMD制御パラメータの解析的検討

(1) 図2は重量と振動系固有振動数の違いがおよぼすブロックと振動系の振動低減効果への影響を示している。図に示すように高さ $t=0.075\text{m}$ と $t=1.0\text{m}$ のブロック（重量比が1:100以上異なる）での振動低減効果の差が僅かであったことから、ブロックによる振動低減効果の要因が重量による効果ではなく、地表面の変形拘束による効果であることが推察できる。それに対し振動系の重量を大きくすると、固有振動数と同じ加振振動数に対する低減効果は大きくなった。また、振動系の固有振動数を変えると、その固有振動数と一致する加振振動数の場合の低減効果がブロック設置時より大きくなった。これらのことから、振動系はその固有振動数での加振にたいして共振することで、振動低減効果を与えることが判る。

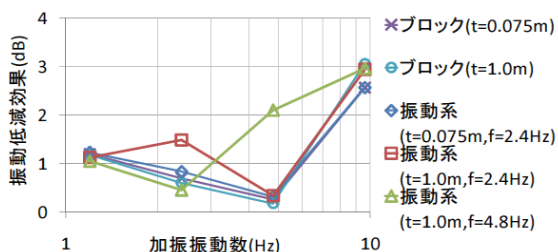


図2 ブロックおよび振動系の振動低減効果に与える重量・固有振動数の影響

(2) 図3は固有振動数での加振に対する振動系の振動低減効果におよぼす減衰定数の影響を示している。図より、減衰定数を小さくすると振動低減効果が大きくなることから、振動系の減衰におけるエネルギーの消散より、加振による振動と振動系の振動が加振源となって生じる振動との干渉が、振動低減効果に寄与していると推察する。

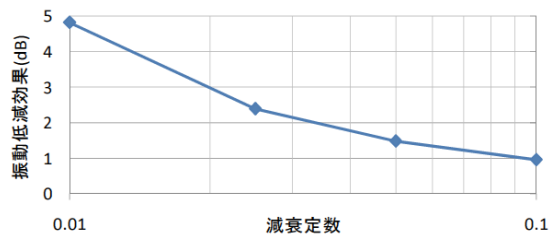


図3 振動系の固有振動数における振動低減効果に与える減衰定数の影響

(3) 図4は異なる加振振動数による加振時の振動系およびブロック設置による振動低減効果を示している。ここで、振動系の固有振動数は加振振動数と一致させている。図より、長さの異なるブロックを比較すると長いブロックでは高振動数域での加振時に振動低減効果が大きいことが判る。図2の結果も併せて考えると、波長が短い高振動数ではブロックの設置範囲での振動の位相差が大きく、入力損失効果と同様のメカニズムで振動低減効果が大きかったと考える。一方、振動系による効果と同じ長さのブロックの効果と比較すると、設置長の長い振動系による低減効果がより大きいことが判る。これは、長い振動系では重量の増加に伴う振動系の振動による加振力の増大と、面的な加振源としての加振領域の増加に伴って振動系が発生させる波動の伝搬パターンが変化し、干渉パターンの変化が生じたためと考える。

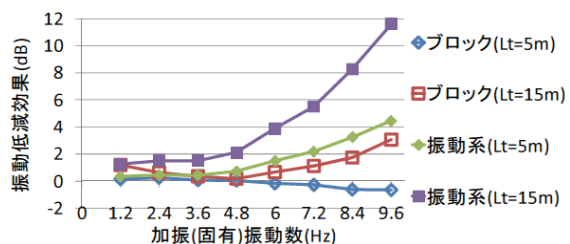


図4 加振振動数とブロックおよび振動系の振動低減効果の関係

(4) 図5は異なる加振振動数での振動系による振動低減効果の面的分布への影響を示している。図より、加振振動数が高くなるほど受振点側の領域で振動低減効果が大きくなるが判る。しかしながら、加振点側の領域では振動が増大するエリアがあることが判る。これは、振動系を設置している基礎コンクリートからの反射や、前述のとおり振動系の加振により生じた波動が制御対象の振

動と干渉していることを示唆している。

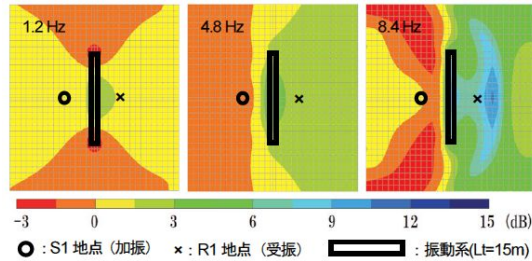


図 5 異なる加振振動数での振動系の振動低減効果の面的分布

実機における効果の検証

(1) 図 6 はブロック設置による振動低減効果を示している。コンクリートブロックの設置枚数が大きくなるほど振動が低減していることが判る。これは、解析でも同様の傾向が確認されており、地表面の変形拘束による効果と考えられる。

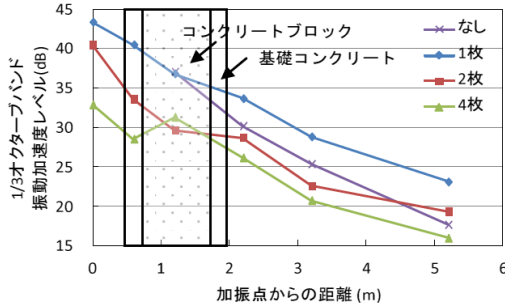


図 6 質量体による振動低減効果

(2) 図 7 は振動系の設置による振動低減効果を示している。コンクリートブロックが 1 枚と 4 枚の場合にブロック設置より振動低減効果が大きいことが判る。2 枚の場合はブロック設置と同程度であった。振動系質量が大きくなるほど振動低減効果は大きくなると考えられるが実験結果はその様になっていない。そこで、実験時に使用した建設重機による加振振動数と振動系の固有振動数との比を取ると、コンクリートブロック 1 枚:1.037, 2 枚:1.125, 4 枚:1.075 であった。このことから、2 枚の場合には振動数が同調してなかったため振動低減効果が小さくなったものと考えられる。

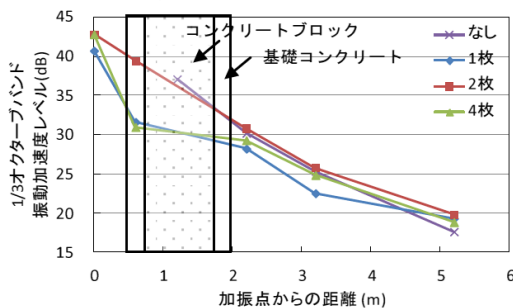


図 7 振動系による振動低減効果

建設重機による地盤環境振動対策として TMD 制御を可能とするための基礎研究を実施した。その結果、建設重機により発生する振動は、表層が軟弱な 2 層地盤において人体の

振動感覚が優れている振動数域で顕著であること、その波動は表面波が主体であることを明らかにした。表面波対策として地表面に TMD を設置した場合、質量が大きく、系の減衰は小さく、固有振動数比が 1 に近いほど振動低減効果を得られることを解析、および実大実験から明らかにした。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計 3 件)

坂崎 友美, 小林 真人, 内田 季延, 松本 泰尚, 重機走行に対する防振溝の振動低減効果に関する実験的検討, 土木学会第 68 回年次学術講演会, 2013, 日本大学生産工学部(千葉県・習志野市)
長沼 俊介, 松本 泰尚, 小林 真人, 西村 忠典, 建設作業振動に対する地表面上での制御に関する解析的検討, 土木学会第 69 回年次学術講演会, 2014, 大阪大学(大阪府・豊中市)
岩根 康之, 小林 真人, 石見 理朗, 松本 泰尚, 振動制御装置を用いた建設作業振動の伝搬経路対策に関する実験的検討, 土木学会第 70 回年次学術講演会, 2015, 岡山大学(岡山県・岡山市)

[産業財産権]

出願状況(計 1 件)

名称: 地盤振動低減装置および地盤振動低減工法

発明者: 小林真人・松本泰尚

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特許願 2014 - 150343 号

出願年月日: 2014 年 7 月 24 日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 真人 (KOBAYASHI, Masahito)

飛鳥建設株式会社・室長

研究者番号: 60443652

(2) 研究分担者

松本 泰尚 (MATSUMOTO, Yasunao)

埼玉大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号: 90322023

(3) 連携研究者

坂崎 友美 (SAKAZAKI, Tomomi)

飛鳥建設株式会社・研究員

研究者番号: 20616685

(平成 24 年度参画)

(4) 研究協力者

西村 忠典 (NISHIMURA, Tadanori)

岩根 康之 (IWANE, Yasuyuki)