

土嚢を用いた地盤振動低減工法に関する基礎的検討

Reduction of Vibration for Ground Response Using a Soil-Bag Method

石橋 敏久 清田 芳治
八幡 夏恵子¹⁾ 桜庭 和子

要 約

土嚢積層体を交通振動などによる受振側の建物基礎や工事機械など（振動源側）の基礎の下に埋設して地盤振動を低減する工法が実証的に検討されている。その工法の低減特性を解析的に検討する目的で2種類の振動実験（起振機による上部鉛直加振と振動台による下部鉛直加振）を実施した。その結果、低減効果は充填材料の剛性や減衰定数に依存することが分かった。また、振動実験と単純せん断試験やせん断波速度推定の結果から土嚢モデルの動的物性値を求め、これらの値を用いたシミュレーション解析を実施した結果、三次元FEM解析は低減効果の検討に有効な方法であることが分かった。

目 次

- I. はじめに
- II. 振動実験の概要
- III. 振動実験結果
- IV. せん断波速度の推定
- V. シミュレーション解析
- VI. おわりに

I. はじめに

交通や工事機械などの環境振動により発生する地盤振動を低減する工法の一つとして土嚢積層体を用いる方法があり、松岡らによって実証的に低減検討^{1),2)}他がなされ低減効果が認められている。

著者らは、その低減効果を確認することと解析的に効果を検討する際に必要な土嚢の動的特性を把握する目的で、土嚢モデルを用いた2種類の振動実験（起振機による上部加振と振動台による下部入

力加振）を行った。これらの実験はFig.1に示したように地盤振動の伝播系から見るとそれぞれ振動源側と受振側でのモデルに対応する。さらに、土嚢地盤（充填材料）や土嚢モデルの材料物性値を把握する目的で単純せん断試験やせん断波速度の推定（板たたき法）を実施した。

本論文では、振動実験結果から得られた各種土嚢モデル（Table 1参照）の振動低減効果を論じるとともに、その振動特性と単純せん断試験やせん断速度推定結果から求められた物性値を用いて三次元FEMにより振動台加振結果のシミュレーション解析を実施し、その有効性を示す。

II. 振動実験の概要

Fig.2に2種類の振動実験の概要を示す。実験のパラメータは、土嚢モデルの高さ（積み上げ段数）と充填材料の種類とした。

1. 実験に用いた土嚢モデル

土嚢の重量は20kgとし、平面サイズは43cm×39cmで高さがほぼ9cmとなるように転圧した。実験に用いた土嚢モデルの種類と実験

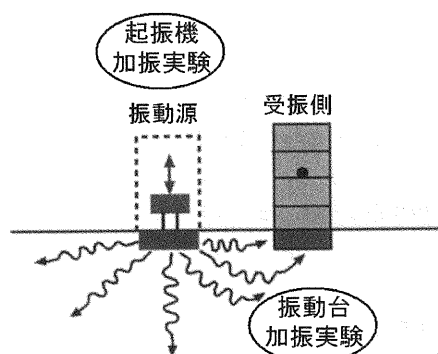


Fig.1 振動実験と地盤振動伝播系の関係
(Schematic Relation between Vibration Tests and Wave Propagation System)

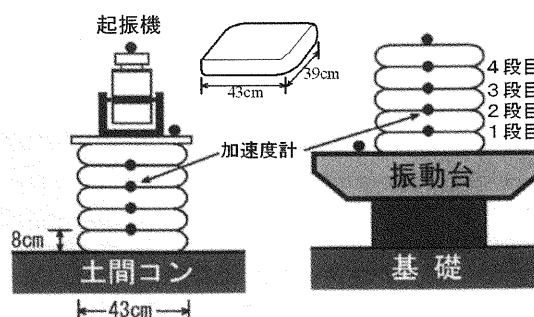


Fig.2 土嚢モデルと振動実験の概要
(Soil-bag Models and Outline of Vibration Tests)

1) 遠山建築事務所

キーワード：環境振動，土嚢モデル，地盤振動低減，振動実験，動的性質，動的性質1次振動数，減衰定数，三次元FEM

方法の関係を Table 1 に示した。土嚢の充填材料は珪砂 2 号, 3 号, 4 号及び調合砂の 4 種類で, 1 列に 5 段積み基本とした。珪砂 3 号については積み上げ段数による振動特性の違いを検討するため, 1 列で 3~8 段積みの 5 種類のモデルを用いた。

Fig. 3 に充填材料の粒径加積曲線を示したが, 粒径は珪砂 2 号が大きく珪砂 4 号が小さい。調合砂は珪砂 2 号から珪砂 6 号までを混合し粒径 0.1mm~4.75mm が対数軸上で直線となるように配合したものである。Table 2 に各充填材料の密度と粒径(平均値)の値を示したが, 密度は 1.47~1.74g/cm³ で, 粒径が小さいほど密度も小さい値となっている。

Fig. 4 に単純せん断試験³⁾から得られた調合砂と珪砂 3 号の剛性と減衰の歪依存性の関係を示したが, せん断弾性係数の値はせん断ひずみが小さい範囲(~0.001%)では, ほぼ一定で調合砂は珪砂 3 号より 1.4 倍程度大きいことが分かる。

2. 振動実験方法

Table 1 に示したように振動台加振では珪砂 3 号のみを実施し, 起振機加振ではすべての充填材料で実施している。Photo 1 に起振機加振実験の様子を示した。起振機はホクスイ・ブラウン製, VTS-100 システムを, 振動台は振研製, G-9215S を使用したが, 料加振実験とも加振は 10~100Hz で掃引時間が 90 秒のログ・スイープ波とした。起振機の加振力(頂部の加速度と稼働部の質量から求めた)は振動数により変化するが 30~70N の範囲であり, 振動台は 60gal 一定加振とした。

Table 1 土嚢モデルと実施した実験
(Soil-Bag Models and Tests)

土嚢モデル				振動実験	単純せん断試験
充填材料と名称		高さ (cm)	積み上げ 段数	実験の種類 (加振振動数)	
珪砂2号	K2	40	5	起振機加振 (10-100Hz)	
珪砂3号	K3-3	24	3	起振機加振 (10-100Hz) 振動台加振 (10-100Hz)	実施
	K3-5	40	5		
	K3-6	48	6		
	K3-7	56	7		
	K3-8	64	8		
珪砂4号	K4	40	5	起振機加振 (10-100Hz)	
調合砂	Km	40	5	起振機加振 (10-100Hz)	実施

Table 2 土嚢モデルの物性値
(Properties of Sands in Test Model)

充填材(名称)	γ : 密度 (g/cm ³)	Ds: 平均値 粒径 (mm)
珪砂 2 号	1.472	1.70
珪砂 3 号	1.447	1.18
珪砂 4 号	1.441	0.84
調合砂	1.741	—



Photo 1 起振機加振実験
(Exciting Test)

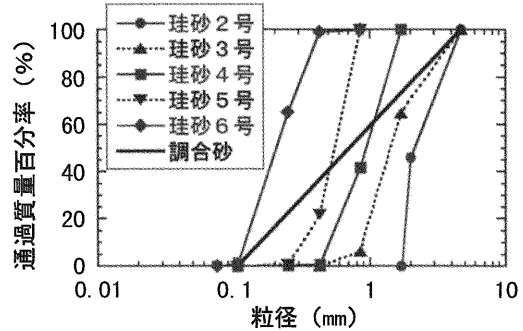


Fig. 3 珪砂 2~6 号と調合砂の粒径加積曲線
(Distribution Curves of Grain Size)

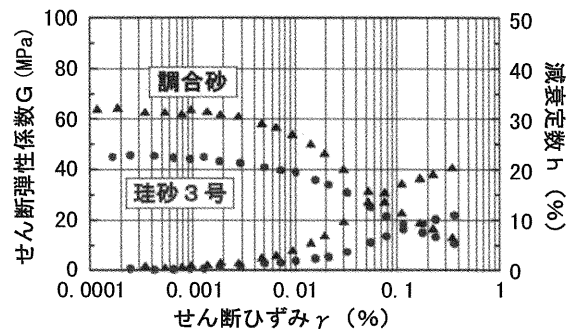


Fig. 4 珪砂 3 号と調合砂の動的特性
(Dynamic Characteristics of K3 and Km)

測定は, Fig. 2 に●で示した位置に加速度計 (YAMCO 111BW) を設置して同時測定を行い, 測定結果は応答波形 (300Hz サンプリング) のフーリエスペクトルを求め, 起振機加振では加振力 1N 当たりの加速度共振曲線で, 振動台加振ではフーリエ振幅で示した。

III. 振動実験結果

1. 珪砂 3 号の振動特性

積み上げ段数 (3~8 段) をパラメータとした珪砂 3 号の結果について示す。

Fig. 5 に珪砂 3 号 5 段積みの起振機加振と振動台加振による各段での応答曲線を示す。両加振での 1 次ピーク振動数はほぼ一致し, 上段 (4 段目) から下段 (1 段目) に向かって応答が小さくなっていくことが分かる。即ち, 起振機加振では加振位置から遠ざかるほど応答が低減し, 振動台加振では上段になるほど応答が増幅する現象が表れている。

Fig. 6 に珪砂 3 号 3~8 段積みの各上段の結果を示した。1 次ピーク振動数は 35~55Hz で, 段数が多くなるほど低下する傾向が見られる。図中に 1 次ピーク振動数での減衰定数を $1/\sqrt{2}$ 法で求めて付記したが, 両加振とも 8~12% 程度の値を示している。

2. 充填材料による振動特性の違い

起振機加振実験に用いた土嚢の充填材料は珪砂 3 号のほか, 珪砂 2 号と 4 号及び調合砂の 4 種類である。

Fig. 7 に 5 段積み起振機加振での各充填材料による応答曲線を示す。1 次ピーク振動数の値は粒径の大きい 2 号が低く粒径が小さくなるほど高くなる傾向を示しているが, 調合砂は 4 号よりもやや高

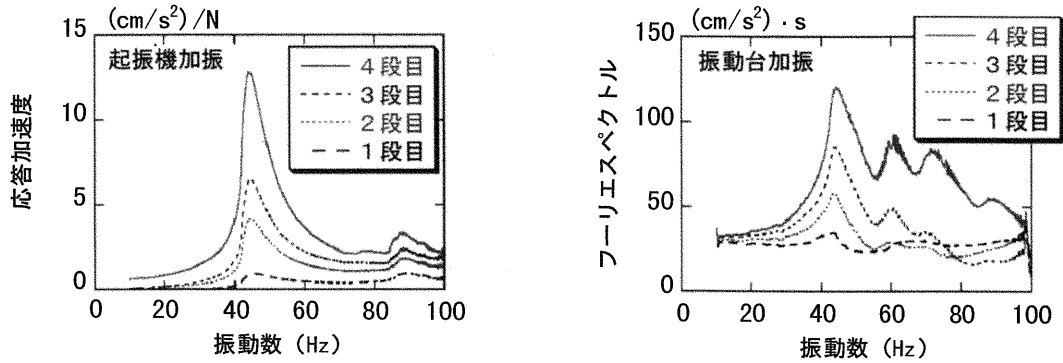


Fig.5 珪砂3号5段積みの応答曲線
(Response Curves for K3-5)

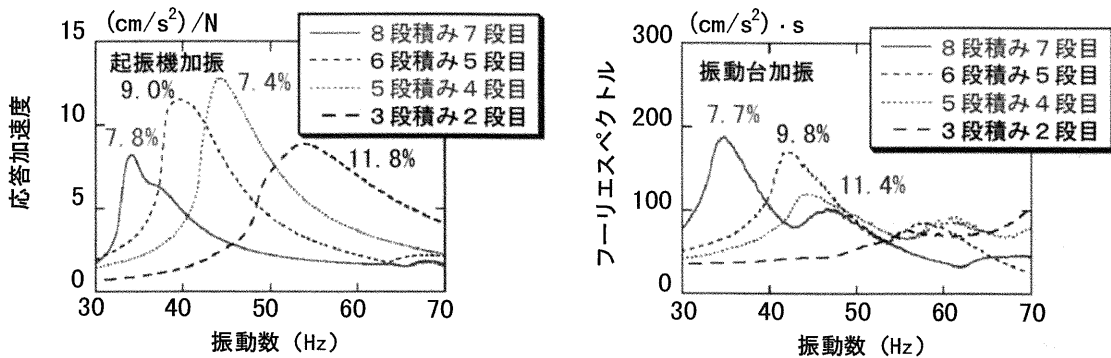


Fig.6 珪砂3号3～8段積みの応答曲線
(Response Curves for K3-8, K3-6, K3-5 and K3-3)

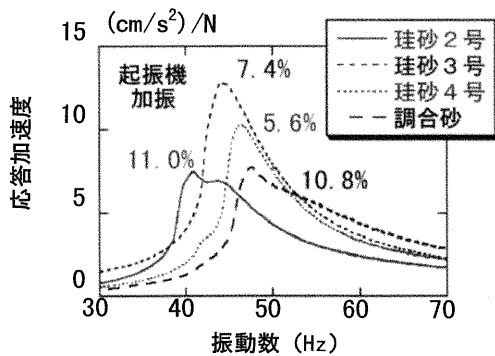


Fig.7 珪砂2～4号及び調合砂（5段積み）の応答曲線
(Response Curves for K2, K3, K4 and Km)

い。減衰定数を図中に付記したが、3号と4号が6～7%程度に対し粒径の大きい2号は11%で、調合砂も2号と同程度と大きな減衰を示す。即ち、調合砂はほか3種類の充填材料に比べ、剛性が高く減衰も大きい特徴を有している。

Fig.4に示した珪砂3号と調合砂のせん断ひずみ $\gamma=10^{-4}$ %近傍によるせん断弾性係数の比は、実験結果の1次振動数比の二乗が剛性に比例する関係から求めた値とほぼ同程度（1.4倍程度）で相対関係は両者で整合している。また、減衰定数に関しても、調合砂が珪砂3号に比べ大きい点で対応している。

3. 土嚢モデルの振動低減特性

Fig.5の起振機加振結果では、加振位置から離れる（下段になる）に従い応答が低減することを示したが、この特性について検討を行った。

Fig.8は珪砂3号5段積みの4段目に対する3～1段目の応答比である。Fig.9とFig.10は3～8段積みの各上段から1段下に対する応答比と4種類の充填材料による5段積みの4段目に対する応答比を示す。これらの結果から以下のことが分かる。

- ①全体的に応答比は1より小さく、下段になるに従って応答比が小さくなり振幅は低減している。（←Fig.8）
- ②1段下の応答比では積み上げ段数が多い8段と6段積みの低減傾向は類似している。3段積みでは低減が大きい。（←Fig.9）
- ③充填材料に関しては3号と4号はほぼ同様な傾向を示し、2号は調合砂と酷似している。（←Fig.10）
- ④図示した振動数の範囲には1次ピーク振動数も含まれているが、応答比は全体的に振動数の低下と共に減少する傾向を示し、1次ピークの影響は見られない。

Fig.11には、起振機加振での5～8段積みの1次ピーク振動数（値は図中に示した）における各段の応答をそれぞれ上段から1段下を基準として示した。上から2段目の応答比はいずれも0.5倍前後、3段目の応答比は5段と6段積みでは0.3倍程度となっており、1段下がるとおおよそ1/2程度低減していることが分かる。この傾向は文献2)の結果とも整合している。

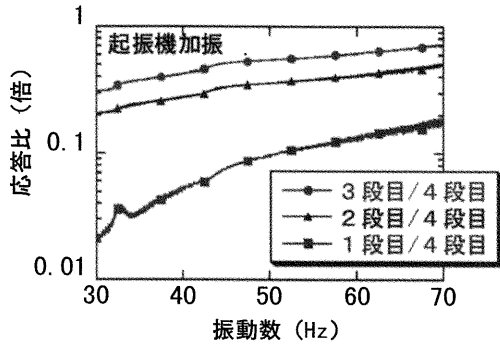


Fig.8 珪砂3号5段積みの応答比
(Spectrum Ratio for K3-5)

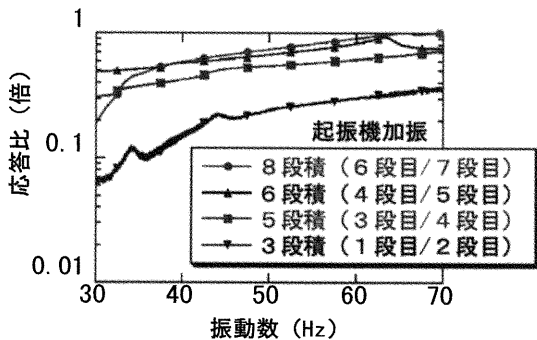


Fig.9 珪砂3号5段積みの応答比
(Spectrum Ratio for K3-3, K3-5, K3-6 and K3-8)

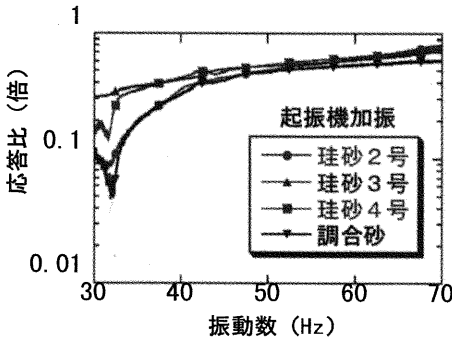


Fig.10 珪砂2号~4号5段積みの応答比
(Spectrum Ratio for K2, K3, K4 and Km)

Fig.12には、振動台加振での5~8段積みの1次ピーク振動数(値は図中に示した)における応答をそれぞれ1段目に対する各段の応答倍率で示した。積み上げ段数によらず高さ方向にほぼ一定の分布を示しており、8段積みの7段目では応答倍率が6倍程度となっている。振動台加振の1次振動数での減衰定数(Fig.6参照)は8~12%と比較的大きいため、土囊の高減衰による影響(低減)が生じ、この程度の比較的小さな応答倍率になったものと考えられる。

IV. せん断波速度の推定

低減効果の解析に必要な土囊の物性値は密度とせん断波速度(以

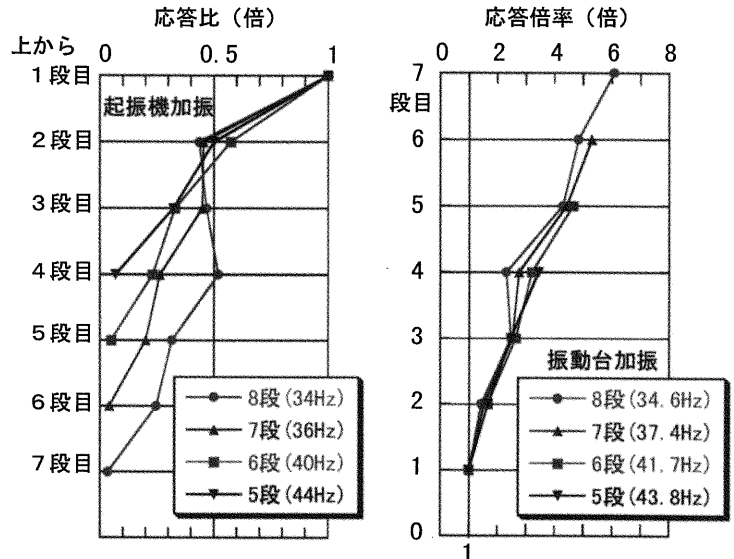


Fig.11 起振機加振の最大振幅比
(Acceleration Ratio Distribution from Exciting Tests)

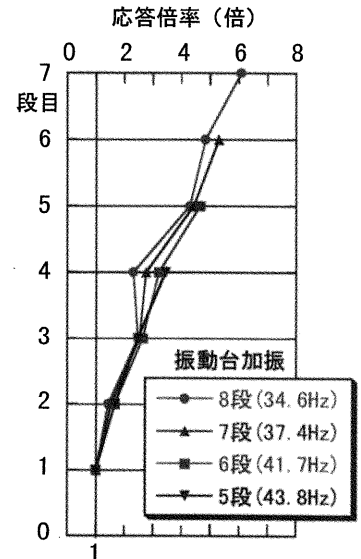


Fig.12 振動台加振の最大振幅比
(Acceleration Ratio Distribution from Shakeing Table Tests)

下、S波速度と呼ぶ)、ポアソン比、減衰定数である。密度と減衰定数については既に示したとおりである。特に、せん断弾性定数(密度とS波速度から求められる)は重要なファクターとなる。そこで、珪砂3号についてS波速度の推定を試みた。

S波速度は、Fig.13に示したように上段の土囊上に剣山を差しハンマーで剣山を水平方向に叩くことによりS波を発生させて土囊各点の応答波形の立ち上がり時間と土囊の厚さの関係から求めた。

Fig.14に剣山の左右両側から叩いた土囊モデル各点の応答波形(10000Hzサンプリング)を重ねて示したが、下段になるほど時間遅れが大きくなっている。この波形から求めたS波速度をFig.13に付記したが、4~3段目での値は79m/sで、3~2段目では84m/sであった。この4~3段目の値(79m/s)を用いて各段の土囊の密度を 1.447g/cm^3 一定と仮定して拘束圧を考慮した各段のS波速度を求めてFig.13中に推定結果として付記した。なお、S波速度79m/sは、せん断弾性係数が9.5Mpaに相当するが、この値はFig.4に示した単純せん断試験から求められた値のおよそ1/4程度である。

V. シミュレーション解析

振動実験の目的は、土囊工法による振動低減効果を解析的に検討する際に必要な土囊の動的物性値を評価することであった。ここまでの検討により解析を行うための物性値がほぼ得られたので、これらの値を用いて三次元FEMによる振動台実験(珪砂3号5段積みモデル)結果のシミュレーション解析を実施した。

解析モデルは実験と同様に5層とし、各層共64個のソリッド要素とした。せん断弾性係数はS波速度の推定結果から求め、密度は 1.447g/cm^3 、ポアソン比は0.33とした。なお、土囊の袋の影響や充填材料自身の減衰(材料減衰)は考慮していない。

解析モデルへの入力波はFig.15の下段に示した振動台加振実験による入力波とし、これをモデルの最下層に入力した。

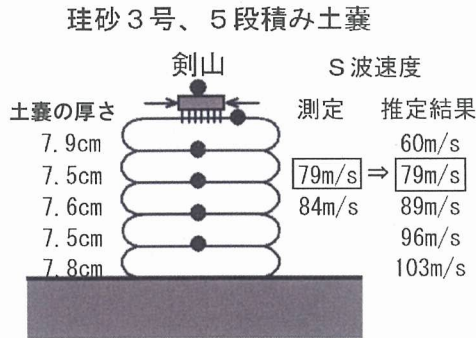


Fig.13 S 波速度の測定法と推定結果
(Method of Shear Wave Logging and
Shear Wave Velocity from Estimation)

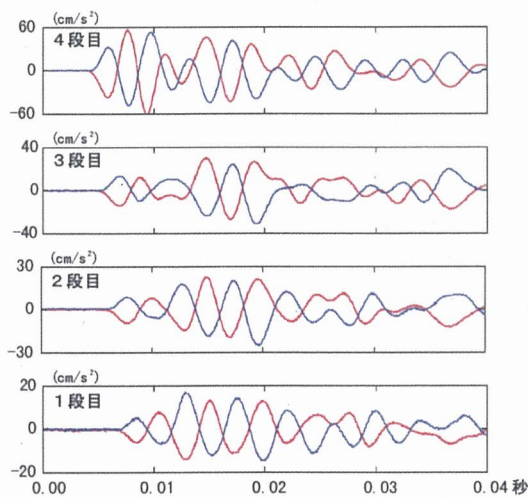


Fig.14 左右板たたきによる S 波の観測波形
(Shear Waves in Observation by
Hitting Right and Left Sides)

これらの解析条件で解析を行ったところ、1 次ピーク振動数は 80Hz 付近となった。そこで、ピーク振動数が実験結果 (43Hz 付近) と同程度となるようにせん断弾性係数を調整した。その結果として、モデル頂部の加速度応答波形を Fig. 15 の 2 段目に均質モデルとして示した。なお、同図の上段は振動台実験結果の同位置での応答波形である。また、振動台入力に対するモデル頂部応答の伝達関数を Fig. 16 に示す。同図上段が実験結果で 2 段目が本解析結果である。これらの図から 1 次ピーク振動数付近での波形や伝達関数の振幅は実験結果と良く対応するが、55Hz 以上の高振動数成分の応答特性や振幅は異なっている。

Fig. 17 に解析結果のピーク振動数付近における変位振幅の分布図 (コンター) を示した。この図から土嚢の外側 (周辺部) と内部 (中央部) の要素で変位が異なり、内部で大きくなっていることが分かる。そこで、外側と内部要素のせん断弾性係数に大小関係を持たせたモデル (不均質モデルと呼ぶ) による解析を実施したところ、外側の剛性を内部に比して相対的に上げたモデルでの解析では、高振動数域でも実験結果に近い性状となった。この解析結果を Fig. 15 の 3 段目と Fig. 16 の下段に示した。

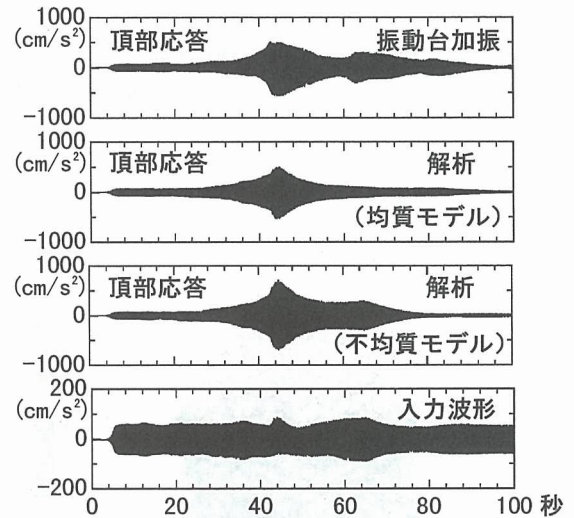


Fig.15 実験と解析結果の加速度波形
(Acceleration Time History
from Test and Analytical Results)

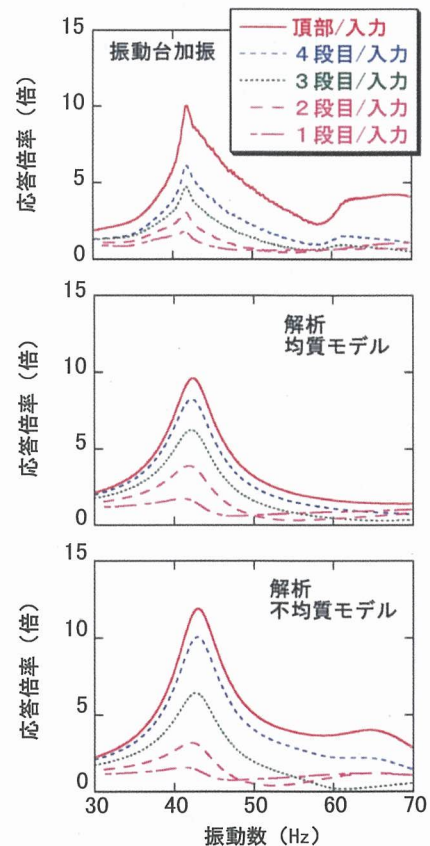


Fig.16 実験と解析結果の伝達関数
(Transfer Function
from Test and Analytical Results)

実現象（振動実験）として影響を与えていると考えられる土嚢の袋や土嚢間の不連続性による減衰発生機構の複雑さを解析では直接取り扱えないが、本解析ではピーク振動数付近において実験結果とほぼ対応した結果が得られた。このことは、土嚢の低減効果を近似的に検討する上で三次元FEM解析は有効な方法であるものと考えられる。

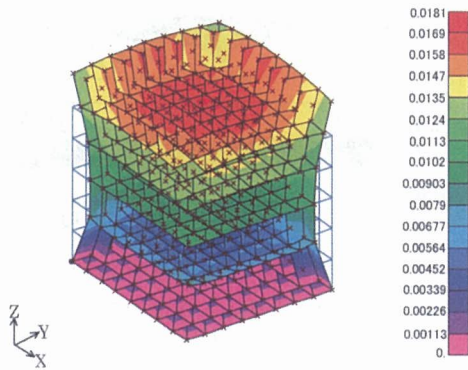


Fig.17 変位の振幅分布図
(Displacement Contour)

VI. おわりに

土嚢による地盤振動低減工法に関し、低減効果を確認するとともに低減効果を解析的に検討する際に必要な土嚢の動的特性を把握する目的で土嚢モデルによる2種類の振動実験（起振機加振と振動台加振実験）を実施した。その結果から低減効果は充填材料の剛性や減衰定数に依存し、これらは充填材料（粒径）の影響を受けることが分かった。また、振動実験と単純せん断試験やせん断波速度推定の結果から土嚢モデルの動的物性値が得られ、この値を用いたシミュレーション解析を実施した結果、三次元FEM解析は低減効果の検討に有効な方法であることが分かった。

土嚢の振動応答は、土嚢の境界条件によって大きく変化するため、動土工法としての低減効果を検討するには、実地盤での振動実験やその解析的な検討が必要と考えている。

参考文献

- 1) 松岡元, 山口啓三郎 他; 「土のう」によって基礎を補強された建物の振動減衰効果, 地盤環境振動の評価・予測・対策に関するシンポジウム, (2001), pp. 125-130.
- 2) 松岡元, 村松大輔 他; 土のう積層体による振動負荷の低減法, 第38回地盤工学研究発表会, (2003), pp. 2265-2266.
- 3) 清田芳治, 萩原庸嘉 他; 土の動的変形特性の評価法に関する研究, 鹿島技術研究所年報第42号, (1994), pp. 247-252.