

固体音領域における浮床工法の防振効果特性

藤 沢 康 仁 縄 岡 好 人

Vibration Isolating Effect of Floating Slab in Structure-borne Sound Frequency Range

Yasuhito Fujisawa Yoshihito Nawaoka

Abstract

A floating slab using glass-wool is generally used for isolating machinery vibration or reducing floor impact sound in buildings. The vibration isolating effect can be predicted from the vibration transmissibility of a single degree-of-freedom, but in the structure-borne sound frequency range, the practical effect is lower than the theoretical value. This report describes the results of applying FEM analysis to predicting the vibration isolating effect of a floating slab. Good agreement was obtained between the FEM and measured results, and the lowering of vibration isolating effect due to the high dimension mode of vibration was well simulated by FEM analysis. Moreover, FEM analysis was applied to 2-stage vibration isolation, which is often used for isolating machinery with a powerful exciting force.

概 要

設備機械室における機器の防振や、ホテル・多目的ビル内で床衝撃音を低減させる場合、グラスウールを緩衝材とした浮床を用いることが多い。浮床の防振効果量は、実務的には防振系を1質点系と仮定した場合の振動伝達率から推定するが、固体音が問題となる周波数領域では防振効果は理論値よりも低下することが知られている。本報ではグラスウール浮床を用いた防振構造の防振効果の予測にFEMを用いたシミュレーションを適用した結果について述べた。FEMによる防振効果量の計算値は実測値と良好に一致し、部材の高次モードの影響による防振効果の低下を再現できた。また加振力が大きな機器に用いられる2重防振の様に複雑な防振構造にもFEMによる防振効果の予測が有効であることを示した。

1. はじめに

グラスウール浮床や防振ゴムなどの防振材の防振効果量については、一般的には防振系を1質点系と仮定した場合の振動伝達率から推定することが多い。しかし固体伝搬音が問題となる周波数領域では、1質点系から求めた防振効果量よりも実際には大きく低下することが知られている。その原因としては、構成部材の高次モードの影響、機器の発生騒音による空気音加振の影響などがあげられる。これらの要因のうち高次モードの影響について調べるため、FEMを用いたシミュレーションを行い、実測値との比較を行った結果について述べる。また加振力が大きな機器の固体音対策で用いられることのある2重防振については、その防振特性も未だ明らかになっていないため、FEMによるシミュレーション及びモデル実験を行い、防振効果特性を明らかにした。

2. グラスウール浮床のシミュレーション

2.1 計算モデル

グラスウール浮床のFEMモデルをFig.1に示す。床スラブ・浮きスラブは4節点シェル要素で、グラスウールはばねとダッシュポットでモデル化を行った。境界条件は床スラブの4周を固定支持とし、グラスウールの動ばね定数と損失係数は実測値を基にTable1のように設定した。要素分割は要素辺長が対象周波数の曲げ波長の1/4以下となるよう行った。防振効果は、防振あり・なしの場合での設置スラブの振動加速度レベル差（挿入損失）で評価することとし、各節点における挿入損失値をエネルギー平均して算出した。なお計算は汎用FEMソフトを用いて、単位加振力により浮きスラブ中央を定常加振した場合の直接定常応答解析を行った。

計算に用いた材料定数をTable1に示す。コンクリートの内部減衰はRayleigh減衰を用い、計算対象周波数範囲で損失係数が1.4~2%となるように係数を設定した。またグラスウールの動ばね定数と損失係数は、「JIS A 6322」浮床用グラスウール緩衝材」に準拠して測定し、ばね要素が負担する面積を動バネ定数に乗じて計算を行った。

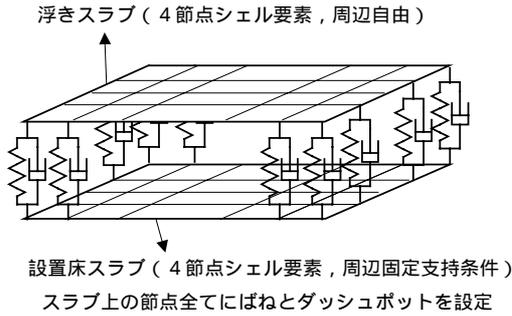


Fig. 1 グラスウール浮床のFEMモデル
FEM Model of Glass-wool Floating Slab

2.2 実験概要

実測を行った防振構造をFig.2に示す。設置スラブは、 $2.85 \times 1.65\text{m}$ スパンでスラブ厚は150mmである。設置スラブの1次固有周波数は実測値で190Hzであった。浮きスラブは、厚さ25mmで密度 96kg/m^3 グラスウールを2枚重ねた上に80mm厚で打設した。防振効果は計算と同様に、防振あり・なしの場合での設置スラブ裏面の挿入損失で評価した。振動加速度レベルの測定は、電動型加振器に1/3オクターブバンドノイズを入力して定常加振した状態で行った。またインパルスハンマーにより、浮きスラブ上の駆動点インピーダンスの測定も行った。

2.3 実測値との比較

コンクリートのヤング率の値がFEMによる計算結果に与える影響について検討するため、浮きスラブ上の駆動点インピーダンスを計算により求めて実測値との比較を行った。浮きスラブは周辺の拘束がなくfreeであり、境界条件が単純であるため実測値との誤差要因が少ないと考えられる。一般的に用いられることが多い静的なヤング率($2.1 \times 10^{10}\text{N/m}^2$)と動ヤング率($3.3 \times 10^{10}\text{N/m}^2$)²⁾を与えた場合の結果をFig.3に示す。計算値と実測値で共に見られる20Hzでのディップは、浮床層の共振の影響であり、1質点系を仮定して求めた共振周波数と一致する。20Hzより高い周波数で見られるピークディップは、浮床層の高次の共振によるものである。静的ヤング率を用いた計算値は、周波数が高くなるとピークディップの位置が実測値と異なっているが、動ヤング率を用いた場合には実測値との対応が良く、高次モードまで正確に予測できていることが分かる。これよりコンクリート部のヤング率には、動ヤング率の値を用いることとした。

浮床の挿入損失について、実測値と計算値を比較した結果をFig.4に示す。挿入損失の実測値とFEMによる計算値共に駆動点インピーダンス測定結果とほぼ同一の周波数でピークディップがあり、浮床層の高次モードの影響による防振効果の低下が現れている。1質点理論値ではこの現象は予測不可であるが、FEMを用いることによって精度良く防振効果量を予測することができている。

Table 1 FEMで用いた材料定数
Material Properties Used in FEM

コンクリート材料定数	
ヤング率	動ヤング率 3.3×10^{10} (N/m ²)
密度	2250(kg/m ³)
ポアソン比	0.17
損失係数	1.5~2% (Rayleigh減衰を用いた)
グラスウール材料定数 (96kg/m ³ 50mm)	
動ばね定数	2.67×10^6 N/m ³
損失係数	0.19

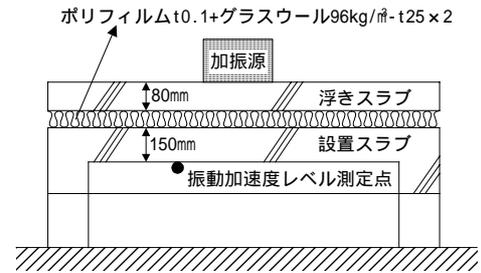


Fig. 2 浮床の実験モデル
Measured Model of Floating Slab

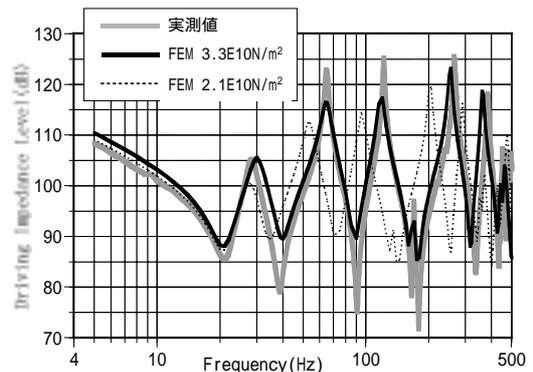


Fig. 3 浮きスラブ中央の駆動点インピーダンス
Driving Impedance of Floating Slab

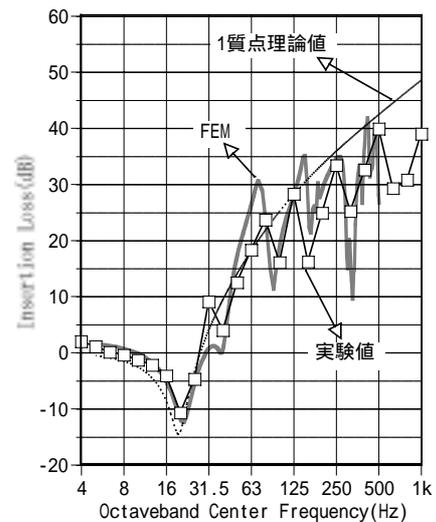


Fig. 4 浮床挿入損失の計算値と実測値の比較
Comparison of Measured and Calculated
Insertion Loss of Floating Slab

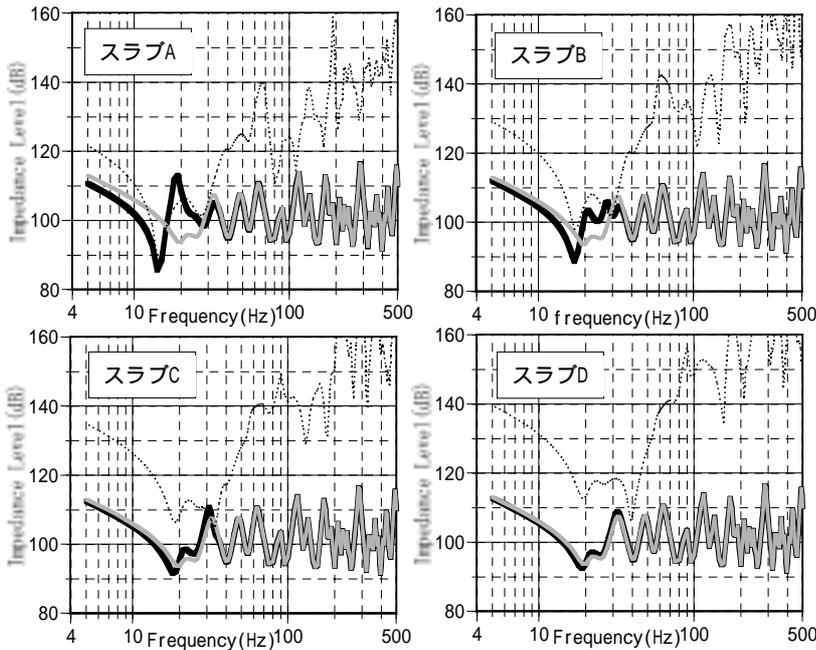


Fig. 5 床スラブを変化させた場合のインピーダンス計算結果
Calculated Impedance of Various Slabs

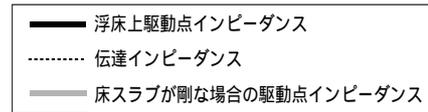


Table 2 計算に用いた床スラブ厚と1次固有周波数
Thickness & First Natural Frequency of Base Slab

浮床層	厚さ	1次固有周波数
浮きスラブ	0.08m	-
緩衝層	96k-50mm	19.4Hz
床スラブ1次固有周波数 (5.8 × 4.8m, 単純支持)	A - 0.15m	19.3Hz (15.6Hz)
	B - 0.2 m	25.7Hz (21.8Hz)
	C - 0.25m	32.2Hz (28.0Hz)
	D - 0.3 m	38.6Hz (34.3Hz)
	E - 剛	-

2.4 床スラブの影響についての検討

床スラブの振動特性が浮床の振動特性に与える影響について調べるため、FEMを用いて、同一の浮床層に対して床スラブ厚さを変化させた場合についてのシミュレーションを行った。Table2に示すように、浮床層の共振周波数が19.4Hz、床スラブの固有周波数が19.3Hz～38.6Hzまでの4ケースを対象とし、比較のために床スラブを剛とした場合も計算した。なお固有振動数の()内の値は、浮床の質量が付加された場合の予測値である。

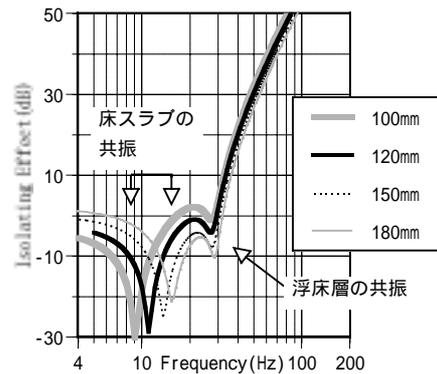
床スラブをA～Eとした場合について、浮きスラブ中央のインピーダンスと浮床中央加振点から床スラブ中央点への伝達インピーダンスをFig.5に示す。

浮きスラブ上のインピーダンス特性は、床スラブA・Bでは浮床の質量を付加した場合の1次固有周波数でのディップが見られるが、床スラブC・Dの場合には、床スラブの影響は無く、床を剛とした場合とほぼ同じである。床スラブが浮床層に比較して剛な場合には、浮きスラブ上では浮床層の振動特性が支配的になるためと思われる。

また伝達インピーダンスのディップは、A・Bスラブでは浮床の質量を付加した場合の床スラブ固有周波数付近と、27Hz付近にある。27Hz付近のディップは、浮床層の共振周波数が床スラブのばねの影響を受けて移動したものであると思われる。またC・Dスラブでは床スラブの1次固有周波数付近と、浮床層の共振周波数19.4Hzにおいてディップが現れている。

浮床層に床スラブの曲げばねを考慮して2質点系と仮定し、床スラブ厚さを変化させた場合の振動伝達率の理論値をFig.6に示す。床スラブが浮床層に比べて剛な場合には、浮床層の1質点系の共振周波数19.4Hz付近で共振するが、浮床層の方が剛な場合には共振周波数は27Hz付近

a. 浮床層共振周波数 > 床スラブ1次固有周波数



b. 浮床層共振周波数 < 床スラブ1次固有周波数

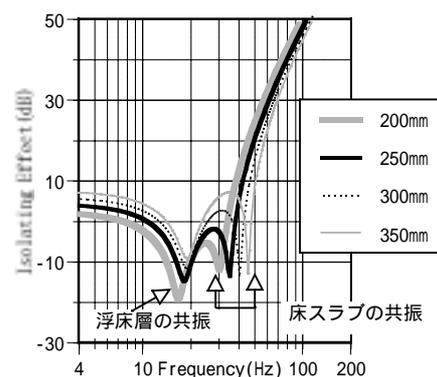


Fig. 6 2質点系による検討

Calculated by Double Degree-of-freedom System

へと移行している。この共振周波数は、床スラブ厚さによらずほぼ一定の値となっているが、浮床層・床スラブの共振周波数・2質点の質量比の関係により決定されるものである。

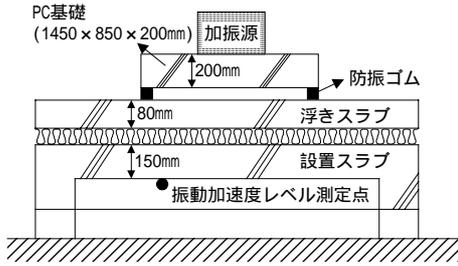


Fig. 7 2重防振の実験モデル
Measured Model of 2-Stage Vibration Isolation

Table 3 材料定数と共振周波数
Properties & Resonance Frequency

PC基礎防振系	防振ゴム	動ばね定数	$8.47 \times 10^5 \text{ N/m}$
		損失係数	0.1
	共振周波数	12Hz	
グラスウール浮床	浮きスラブ	80mm	
	グラスウール	96kg/m^3 -25mm x 2	
	共振周波数	19.4Hz	

3. 浮床を用いた2重防振構造の防振効果

Fig.7に示すような、グラスウール浮床の上にPC基礎を防振ゴムで4点支持した2重防振構造の防振効果について、モデル実験とFEMによるシミュレーションを行った。PC基礎はシェル要素で、防振ゴムはばねとダッシュポットでモデル化し、2.1節の浮床モデル上に配置した。防振ゴムの動ばね定数と損失係数は、インパルスハンマー加振で実測した減衰波形から算出した(Table3)。

2重防振の挿入損失についてのFEM計算結果、2質点系理論値及び実測値をFig.8に示す。グラスウール浮床とPC基礎防振のみの挿入損失も併せて示す。

PC基礎防振の挿入損失は315Hz帯域で大きく落ち込んでいるが、PC基礎の1次固有周波数が370Hz付近にあることの影響である³⁾。2重防振では100Hz以上の周波数で2質点系理論値よりも防振効果は低下し、315Hz帯域で大きなディップが現れている。これは、浮きスラブの高次の固有周波数とPC基礎の1次固有周波数が共に315Hz帯域にあるために、防振効果の低下が大きく現れたと考えられる。FEM計算値は実測値と良好に一致しており、高い周波数域での防振効果の落ち込みをよく再現できている。

4. まとめ

グラスウール浮床を用いた防振構造の防振効果の予測に、FEMを適用し実測値との比較を行った。FEMによる防振

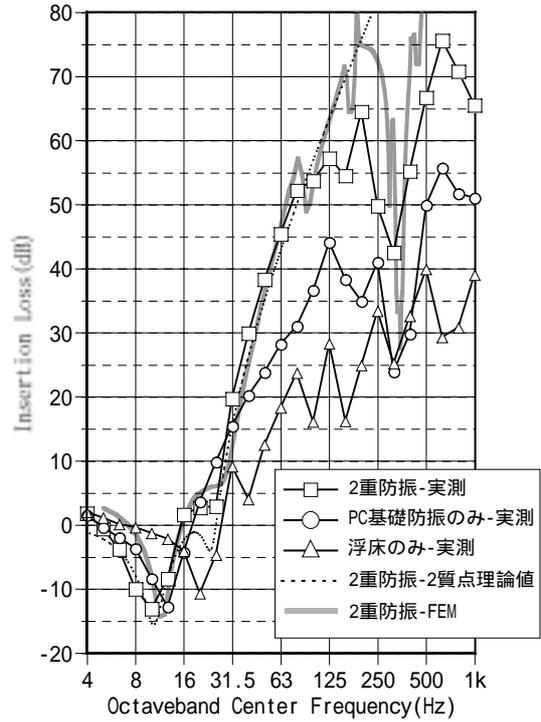


Fig. 8 2重防振の防振効果量
Insertion Loss of 2-Stage Vibration Isolation

効果量の計算値は実測値と良好に一致し、2重防振のように複雑な防振構造の予測にも適用できることを示した。またモデル実験とシミュレーションにより、防振系を構成する部材の高次モードの影響で、固体音領域の周波数域で質点系理論値よりも防振効果が低下することを明らかにした。

参考文献

- 1) 井上, 他: 床衝撃時におけるコンクリート浮床構造の振動伝達特性に関する研究, 日本建築学会計画系論文報告集, 第352号, pp.10~19, (1985)
- 2) 安藤: 各種床構造の振動応答特性の予測とその応用に関する研究, 博士論文, pp.64~69, (1993)
- 3) 平松, 他: 防振材の防振効果に関する検討, 騒音制御 Vol.21 No.4, pp.263~272, (1997)
- 4) 藤沢, 他: 固体音領域における浮床の振動伝達特性の予測, 日本騒音制御工学会講演論文集, pp.49~52, (1999)
- 5) 藤沢, 他: 浮床を用いた2重防振構造の防振効果特性, 日本建築学会大会梗概集, pp.301~302, (2000)