制振材料を用いた床衝撃音低減に関する研究

その5: コンクリートスラブの振動特性の検討

STUDY FOR REDUCTION OF THE FLOOR IMPACT SOUND LEVEL BY USING OF THE DAMPING MATERIALS

Part 5: Study of the vibration response characteristics of the concrete slab

峯村敦雄 —— *1 石川幸男 —— *2

キーワード:
制振材料, コンクリートスラブ, 振動応答, FEM 解析

Keywords:
Damping Material, Concrete Slab, Vibration Response, FEM Analysis

Atsuo MINEMURA —— *1 Yukio ISHIKAWA —— *2

This paper describes several experimental results of the vibration response characteristic making use of the Concrete Slab. The following conclusions have been obtained. First, the test bodies are homogeneous. Second, effect of damping of damping material is different with the material of one dimension and the two-dimensional material. Third, there is dissipation of the energy to the support structure by the way of supporting it. Last, Effect on a vibration reduction by putting a damping material could be confirmed.

1. はじめに

これまで既報¹⁾²⁾³⁾で報告してきたように、制振工学研究会(会長: 長松昭男 東京工業大学 工学部教授)の中に属す「建築(住宅)における制振材料利用技術ワーキンググループ」では、自動車や家庭電化製品の分野において、騒音を制御するために用いられてきた制振材料を、建築分野に展開するために、木質系住宅及び鉄筋コンクリート造集合住宅における床衝撃音低減方法の一つとして適用することを考え、研究を行ってきた。鉄筋コンクリート造集合住宅床への適用については、表1の流れによってコンクリートビームにおける制振特性の検討を行った。その結果、コンクリートビームを基材として制振材料を貼付したとき、質量効果及び曲げ剛性の増加による効果以上に制振による振動低減効果があること、損失係数がコンクリートビームの応答振幅に依存しないこと、及び振動応答のFEM解析値と実験値が良い対応を示すことが確認できた。

また前報⁴⁾ではこれらの結果を踏まえ、表1の②に示したように、コンクリートスラブを基材として拘束型制振材料を貼付したときの、振動低減効果に対するパラメータの検討を行った結果、コンクリートビームでの結果と同様、制振による振動低減効果があること、本研究の範囲では室温の変化に系の損失が依存しないことを確認した。しかしながら、振動低減効果に対する制振材の影響と、設置状況や固定条件などの構造に関わる影響を定量的に分離できなかった。

本報では、表1の③に示す位置づけとして、前報⁴⁾で試験体としたコンクリートスラブの基本的な振動特性を知るために、スラブの支持条件を単純化し、モビリティ、実験モード解析による検討を行った。また今後、床衝撃音を予測するための取りかかりとして、有限

表1 研究の流れ

要素法を用いた振動応答解析を行い、実測値との比較をし、モデル化の違いによる予測精度の検討を行ったので、その概要を報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体として用いたスラブ及び使用機器を図1に、検討したスラブ構成を表2にそれぞれ示す。今回用いたスラブは、前報⁴⁾で用いたものと同じの試験体で、設置状態による境界条件を単純化し、周辺構造物へのエネルギー損失を極力小さくするために、22個のコイルスプリングで支持した。これによる支持系の固有振動数は、計算上コ

*1 鹿島技術研究所 主任研究員・博士(工学)
(〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)
*2 サイバネットシステム(株) メカニカルCAE事業部

*1 Senior Research Engineer, Kajima Technical Research Institute, Dr. Eng.

*2 General Manager, Cybernet Systems Co. Ltd., Mechanical CAE Div.

ンクリート素面 (type1) で 5.78Hz, 制振材付き (type2') で 5.55Hz となった。また制振材付きでは, コンクリート面を上側 (type2') に設置した。加振点, 受振点ともスラブ上面 (コンクリート面) とし, 対角線上の中央及び 4 分点の位置に設けた。

加振は動電型加振器による, 擬似ランダム信号を用いた定常加振とした。

2.2 損失係数の算出

加振器の力検出器から得られた加振力と, 応答点の振動速度より周波数応答関数 (モビリティ) を求め, (1) 式の半値幅法にて損失係数を求めた。

$$\eta = \frac{f_{i2} - f_{i1}}{f_i} \dots (1)$$

ここで, η は損失係数, f_i は i 次の共振周波数 (Hz), f_{i1} , f_{i2} ($f_{i1} < f_{i2}$) は周波数応答関数の共振周波数 f_i における極大値より 3dB 低下したときの周波数 (Hz) である。

2.3 実験モード解析

P1 に固定した加振器の力検出器から得られた加振力と, 図 1 に示すメッシュ交点上 (77 点) の応答点の振動加速度から求めた周波数応答関数 (アクセラランス) を, 多項式最小二乗法で一自由度系のカーブフィットをする事でモードパラメータを算出し, モード図を求めた。

3. FEM 解析概要

振動応答予測には, 以下の 2 種類の異なる FEM 解析手法を用いた。解析には実測で求めた表 3 に示す材料の各種物性値を用いた。なお境界条件は何れの節点も拘束を受けない支持条件で計算を行った。

(1) FEM1 (使用ソフト: VOLINS)

「その 3」³⁾の梁材の振動応答解析に用いた手法で, 多孔質材料を含む 3 次元多層構造パネルの音響振動挙動をシミュレートする解法として J.P.Coyette⁹⁾等により定式化されており, 構造を固体と流体の混合体として取り扱っている。

要素は全てソリッド要素とし, 要素分割は各材料とも長辺方向 48 分割, 短辺方向 36 分割, また厚さ方向はコンクリート 3 分割, ブチルシートと鋼板は 1 分割した。

材料間の連続性に関して, コンクリート・ブチルシート・鋼板は一体運動すると仮定し, 連続体でモデル化した。今回の解析では多孔質材料は用いていないので, 周波数応答に関する計算は固体の変位振幅のみ考慮した計算となっており, 1Hz 刻みで計算した。

(2) FEM2 (使用ソフト: MSC/NASTRAN)

要素は全て固体の板要素として扱い, type1 は 1 枚の板, type2' は 3 枚の積層板としてモデル化した。要素分割は各材料とも長辺方向 16 分割, 短辺方向 12 分割し, 材料間の連続性に関して FEM1 と同様に, 連続体でモデル化した。

4. 実験結果及び考察

4.1 損失係数の検討

今回測定した結果と共に, 「その 3」³⁾のビームと「その 4」⁴⁾のボルト固定したスラブの測定結果を併せて図 2 に示す。

コイルばねで支持したスラブは, type1 の 1 次固有振動数で僅かに大きな値を示しているが, 制振材の有無に関わらずほぼ平坦な周波

図 1 測定点及び使用計測機器

表 2 試験体スラブ構成

種類	仕様
type1	コンクリートスラブ素面 鉄筋コンクリート (I×w×t=3,400×2,500×150mm, S=8.5m ²) 面密度: 358kg/m ²
type2 & type2'	拘束型制振材料貼付タイプ 鉄筋コンクリート + 粘弾性体 (ブチルシート, t=3.0mm) + 拘束層 (鋼板, t=3.2mm) 母材, 制振材, 拘束層は制振材の粘着性で接着 面密度: 388kg/m ²

type2: 鉄板面上面設置, type2': コンクリート面上面設置
(何れも上面加振, コンクリート面受振)

表 3 計算に用いた材料の物性値

材料	コンクリート	ブチル		鉄
対象周波数 (Hz)	30~200	30~79	80~200	30~200
ヤング率 (N/m ²)	3.25E+10	2.00E+06	3.00E+06	2.10E+11
ポアソン比	0.17	0.49	0.49	0.28
密度 (kg/m ³)	2390	1839	1839	7760
損失係数	7.00E-03	1.1	1.2	1.00E-04
厚さ (m)	1.50E-01	3.00E-03	3.00E-03	3.20E-03

数特性を持っている。また制振材を貼付 (type2') することで, 損失係数が type1 の約 3 倍となった。

コイルばねで支持したスラブとビーム (2 点つり下げ支持) の比較では, 制振材が無い場合は両測定値とも 0.01 を若干下回っており, 僅かであるがスラブが大きな値を示している。しかし制振材を貼付した場合, 損失係数は大きくなるが, スラブとビームではその増加量が異なり, スラブに対し, ビームではおよそ 2 倍の値となった。この原因の詳細は今回の実験では明確ではないが, 制振材の制振効果が 1 次元の材料と 2 次元の材料では異なっている可能性が示唆される。

スラブの設置条件の違いでは, 制振材の有無に関係なく何れもボルト固定の測定結果が大きくなっている。また, 制振材を貼付することによる損失係数の上昇は, コイルばね支持で約 3 倍, ボルト固定で約 1.6 倍となっており, 支持条件により見かけ上の損失係数が異なっている。以上の原因は, スラブから支持構造体へのエネルギーの散逸によるものと思われる。

4.2 実験モード解析の検討

実験モード解析から求めた type2' のモード周波数とモード図を図3に示す。またこれらのうち、スラブの曲げモードを表す#1～7のモード図に相当する type1 のモード周波数を表4に示す。

type2' では、コイルスプリングと試験体スラブからなる一質点系のモード周波数は、当初の予測値よりも5%大きくなっているが、曲げモードの周波数に比べ十分低いため、本実験の目的であるスラブの曲げ振動応答に与える影響は小さいものと判断した。また全てのモード図で対称性が認められており、加振器設置等の偏荷重の影響はなく、また試験体の均質性が確保できている。type1 についても同様のことが確認できた。

何れのモードも type1 に比べ type2' のモード周波数が小さく、プチルシートと鋼板を貼ることによる影響は、曲げ剛性に与える影響より質量の増加の影響が大きいことがわかる。

4.3 モビリティの検討

加振点 P1 の駆動点モビリティと P1 から P3 への伝達モビリティを図4に示す。またモビリティの共振ピーク周波数を求め、前述のモード周波数と比較した結果を表4に示す。

駆動点モビリティでは、コイルスプリングによる共振ピークが大きく表れている。その他の共振ピークでは type2' の共振周波数が type1 より低くなっている点と、モビリティレベルが小さくなっている点の特徴として上げられる。このレベル差は、周波数が高くなる程大きく、また駆動点モビリティより伝達モビリティの方が大きくなる傾向にある。レベル差が一番小さい #1 モードのレベル差は 2.4dB であるが、制振材を貼付することによる質量の増加は、(2)式の無限大板の駆動点モビリティレベルから計算すると 0.4dB であることから、制振による振動の低減効果があるものと判断できる。

$$L_{mob} = -20 \log(2.3 \sqrt{\rho E t^2}) \cdots (2)$$

ここで、 L_{mob} はモビリティレベル(dB)、 ρ 面密度(kg/m²)、 E はヤング率(N/m²)、 t は板厚(m)である。

4.4 FEM 解析の検討

駆動点及び伝達モビリティの FEM 解析結果と実測値の比較を図5に示す。また図3のモード図に対応する固有周波数を表4に示す。

type1 の実測値と FEM 解析値の比較では、周波数上は解析値が低く算出される傾向にあるが、#1～7まで良く一致している。また FEM1 より FEM2 が低めに算出される傾向にある。モビリティレベルは、駆動点モビリティでは実測値が大きくなっているのに対し、伝達モビリティは解析値が大きく算出されている。これらの差は 5dB 以上あ

図2 損失係数測定結果

図3 実験モード解析から求めたモード図 (type2')

表4 モード周波数の比較

モード	type1				type2'			
	モビリティ	実験モード	FEM1	FEM2	モビリティ	実験モード	FEM1	FEM2
#1	42.00	41.93	43	42.90	37.75	37.82	44	32.18
#2	50.75	50.72	49	48.46	45.55	45.83	51	40.45
#3	93.00	93.08	91	89.81	84.50	85.33	93	63.11
#4	97.25	97.52	99	97.88	88.75	88.03	95	58.12
#5	123.00	123.39	122	120.11	117.50	118.50	97	70.18
#6	139.80	139.72	137	134.55	124.80	125.78	135	76.49
#7	194.50	186.18	184	179.72	170.00	170.76	136	84.30

り、共振周波数の算出には十分な精度があるが、レベルの予測には十分とはいえず、パラメータの与え方など今後の検討の余地がある。

一方 type2' の実測値と解析値は、低次では共振周波数は近い値となっているが、周波数が高くなる程大きな差が生じている。特に FEM2 では共振周波数がかかなり低く算出されている。また両解析法ともモビリティレベルが大きく異なっており、type1 の解析に比べ精度が低い解析となった。FEM1 と FEM2 では、ソリッド要素とした FEM1 の方が比較の実測値との一致度が高い。

以上スラブの解析では、「その3」³⁾に示したビームの解析に比べ高い一致が得られなかった。type2' は異なる材料の複合体で、モデル化、解析法について更に検討を加える必要がある。特にブチルシートは非線形性が高い物質であり、その取り扱いが解析精度向上に大きく影響するものと思われる。

5. まとめ

コンクリートスラブの振動特性について検討を行った結果、以下の点が明らかとなった。

- ・モード図の対称性から試験体が均質性である事が確認された。
- ・制振材の制振効果が1次元の材料と2次元の材料では異なり、今回の実験では1次元の材料は2次元の約3倍となった。
- ・支持方法により支持構造体へのエネルギーの散逸があり、見かけ上の損失係数が大きくなる。
- ・拘束型の制振材を用いることで、共振周波数において3～10dBの振動低減効果が得られることが確認できた。

しかしながら振動応答の予測に関しては、特に制振材を貼付したときの解析方法やモデル化の課題が残った。

今後、上記の問題及び床衝撃音の低減効果について検討を重ねる予定である。

本報告は下記メンバー（現在）で構成される、制振工学研究会 利用技術分科会「建築（住宅）における制振材料利用技術ワーキンググループ」での活動結果である。

分科会主査：塩田正純（飛鳥建設）、WG主査：山口道征（フナキ・ストン）、副主査：小林真人（飛鳥建設）、幹事：山本耕三（東洋建設）、斎藤和吉（日本特殊塗料）、委員：石川幸男（サイバネティクス）、大石力（環境調査設計）、桂充宏（鴻池組）、小島由紀夫（積水ハウス）、坂場見三（特許機器）、末吉修三（森林総合研究所）、大門静太郎（松下インテック）、牧田雄司（十川工業）、峯村敦雄（鹿島技研）、山崎猛（高山化成）

参考文献

- 1) 小林真人, 大野進一, 塩田正純, 山口道征: 制振材料を用いた床衝撃音低減に関する研究 その1. 制振材料の利用技術に関する実験, 日本建築学会技術報告集第5号, pp.147-157, 1997.12
- 2) 末吉修三, 大野進一, 塩田正純, 山口道征: 制振材料を用いた床衝撃音低減に関する研究 その2. ツーバイフォー住宅における制振材料の床への貼付効果, 日本建築学会技術報告集第6号, pp.115-120, 1998.10
- 3) 小林真人, 塩田正純, 山口道征, 山本耕三: 制振材料を用いた床衝撃音低減に関する研究 その3. コンクリートビームを用いた制振特性の検討, 日本建築学会技術報告集第7号, pp.79-82, 1999.2
- 4) 山本耕三, 塩田正純, 山口道征, 小林真人: 制振材料を用いた床衝撃音低減に関する研究 その4. コンクリートスラブを用いた制振特性の検討, 日本建築学会技術報告集第8号, pp.119-122, 1999.6
- 5) J.P.Coyette, H.Bloemhof: A generalized procedure for modeling multi-layer insulation systems, ISMA19-Tools for Noise and Vibration Analysis, pp.1189-1194

図4 モビリティ測定結果

図5 モビリティ測定及び解析結果

[1999年10月20日原稿受理 2000年2月2日採用決定]