

SBIR 建設技術研究開発助成制度採択技術 コンクリート床スラブの厚さを半減する 環境配慮型「床振動遮断メタマテリアル」の開発

株式会社 3D Printing Corporation CSO こが よういちろう 古賀 洋一郎
みずかみ こういち
 [共同研究者 愛媛大学 水上 孝一
まつした ひとし まつなが ゆうき いのうえ りゅうた
 株式会社竹中工務店 松下 仁志, 松永 裕樹, 井上 竜太]

1. はじめに

本稿では、国土交通省 SBIR 建設技術研究開発助成制度に令和3年度から令和5年度まで採択された、「コンクリート床スラブの厚さを半減する環境配慮型『床振動遮断メタマテリアル』の開発」について解説する。

本研究は、後述するメタマテリアル技術を建築物に応用し、建築物全体で従来の振動伝搬対策としてのコンクリート材料使用量を25%削減、さらに国内建設工事からのCO₂排出量を削減(35,000 t/年)を目指し、建築物の軽量化および建設工事の省労働力化に寄与することを目指すものである。

また本研究は、メタマテリアル技術を共同開発した愛媛大学工学部 水上孝一講師と、コンクリート構造や建設施工に深い知見を持つ株式会社竹中工務店との3者による共同研究にて実施している。ベンチャー企業・大学・大企業の3者による本研究体制は、令和5年度に新設されたベンチャーのための研究助成プログラムにおいてモデル事業として掲載されている。

本稿は、2章で本研究の背景について、3章で発現効果について、4章で研究課題と今後の方針について述べ、最後の5章にて全体を総括し、結

言とする。

2. 研究背景

メタマテリアルは、微細な構造を周期的に配列することで、自然界にはない特殊な機能を付与された人工材料である。光などの電磁波や、音、振動などといった波動を抑制したり、制御したりすることができる。2000年にDavid R. Smithらによって初めて具体的成果(図-1)¹⁾が発表された電磁気分野では、クローキング技術²⁾を用いた透明マントや完全レンズなどへの応用が期待されている。

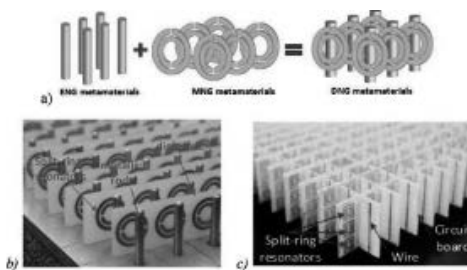


図-1 電磁気分野におけるメタマテリアル¹⁾

それ以降、波動制御に関連するさまざまな分野において研究が盛んに行われ、Additive Manufacturing (AM) による加工技術の発展により微細構造の造形が容易となったことも相まっ

て、ここ数年で論文・学会発表数が急伸している新興の先端技術である。

株式会社 3D Printing Corporation（以下、「3DPC」という）が過去に愛媛大学との共同研究により発明したメタマテリアル³⁾は、音・振動の抑制に関連する従来のメタマテリアルとは原理面で異なる特徴を有する。このメタマテリアルは、4本の高剛性リンクが細く柔軟なヒンジ部材で連結された複合材ラティス構造となっており、その振動モードは主に高剛性リンクが開くように回転するモードと、高剛性リンクが閉じたまま回転するモードの2種類となる。

リンクの剛性および質量とヒンジ部材の剛性を適切に設計することで、2種類の振動モードが現れる振動数に大きな差が生じ、これらの間の振動数帯域が図-2³⁾のグラフの谷で示されている振動遮断帯域（Stop band）となる。このメタマテリアルにより、1/1000程度の振動遮断効果が得られている。

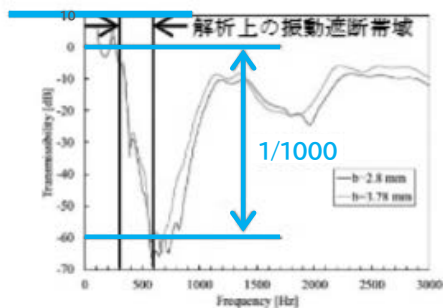


図-2 複合材ラティス構造メタマテリアルとその振動遮断効果の例³⁾

建築におけるメタマテリアル活用においては、音・振動問題の解決とコンクリート使用量の削減に貢献できると考え、コンクリート構造と建築施工の知見を有する竹中工務店を含めた建設分野の企業にアプローチした。

建築を取り巻く音・振動問題はさまざまな原因によって発生し、その振動数の範囲は広範囲にわたるが、比較的低い振動数帯域の音・振動は抑制するのが技術的に難しく、コンクリートを厚く、大きくして剛性や重量を増すことで音や振動の伝

搬を抑制しているのが実情である。

集合住宅などにおいて問題となりやすい床を介した上下階の騒音（床衝撃音）を例にとると、人が歩いたりジャンプしたりした際に生じる「ズシン」といった低い音（数十～数百 Hz：重量床衝撃音）は、コンクリート床スラブが広範囲にわたって振動することにより発生する騒音である。従来は、この振動を効果的に抑制する対策方法がない、あるいはさまざまな制約があることから、コンクリート床スラブの厚さを増し、剛性と質量を大きくして、床そのものが揺れにくいようにする方法を採用してきた。

重量床衝撃音に関して、住居の居室として問題のない音環境を確保しようとした場合、コンクリート床スラブを構造耐力上求められる厚さの約2倍に設計しているケースもある。そのため、何らかの方法で十分に重量床衝撃音を低減することができれば、通常のコングリート床スラブの厚さを1/2程度に削減することも可能となると考えられる。

図-3に示すように、上階の人の動作から下階での音の発生までに至る、音・振動の伝搬経路はいくつか考えられるが、コンクリート床スラブの振動が吊りボルトを介して天井に伝わり（振動伝搬）、天井を揺らして音が発生するという経路が大きなものの一つであると考えられる。また、床衝撃音の大小感覚に影響を与えているのは、ほとんどの場合 63 Hz 帯域（45～90 Hz）という特定の振動数帯域であることが分かっている。

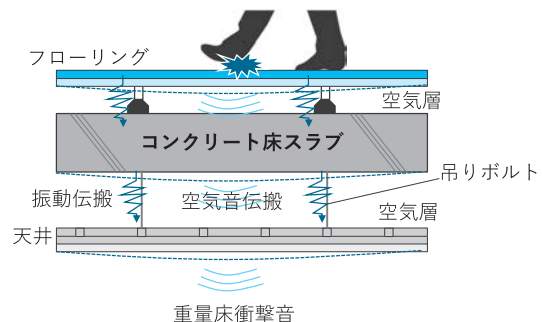


図-3 重量床衝撃音の伝搬経路

本研究は、この「床振動遮断メタマテリアル」

を天井吊りボルトに挿入し、特定の振動数においてコンクリート床スラブから吊りボルトを介して天井に伝わる音・振動を遮断することで、効果的に重量床衝撃音を低減し、その結果としてコンクリート床スラブの厚さを削減することを目指した(図-4)。そこに向け「床振動遮断メタマテリアル」の原理、基礎的性能の検討、それらを具現化するための Digital Transformation (DX)、建築物への応用と実用化に向けての課題抽出および解決を、産学ベンチャーそれぞれの専門性や過去の実績に基づく知見を持ち寄り、効果的かつ効率的に推進した(図-5)。

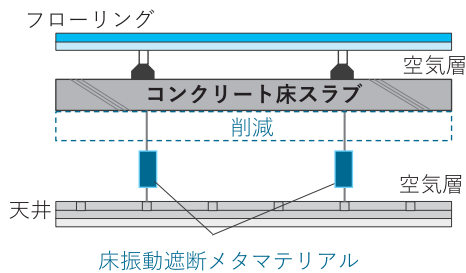


図-4 「床振動遮断メタマテリアル」を用いた重量床衝撃音対策案

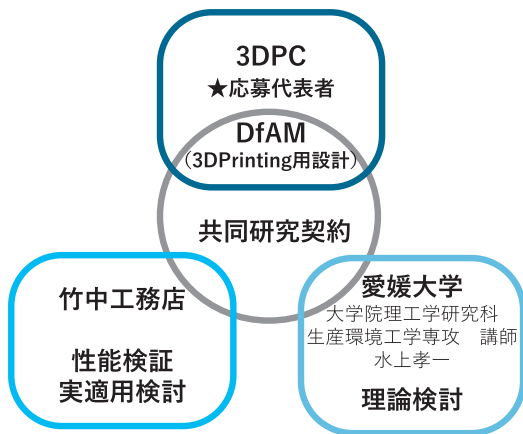


図-5 産学ベンチャーの協業による研究開発体制

本研究では、次の三つの項目を研究対象とした。

- ① 「床振動遮断メタマテリアル」単体での数値解析結果と材料実験結果の整合
- ② 「床振動遮断メタマテリアル」の実用化に向けた自動設計手法
- ③ 実験室での重量床衝撃音低減効果

本研究の特徴は、従来のコンクリートを大量に

使用した音・振動対策との技術置換による環境負荷低減、という観点からの研究であるという点にある。

建築分野でのメタマテリアルに関する研究が机上の検討でとどまっている理由としては、それらには地震や地盤振動を対象としたものが多く、大規模となるため実験的検証が困難で開発フェーズに移行できないことや⁴⁾、メタマテリアルは3Dプリントが比較的容易なプラスチック材料を用いることが一般的であるが、建築のような大きな重量を支えるための耐荷重性の確保や、耐火性能の基準を満たすのが困難であること⁵⁾、あるいは3Dプリントを用いることを想定していない大型のものについては量産が困難であること⁶⁾などが挙げられる。

本研究で検討対象とするメタマテリアルの適用方法では、これらの課題を問題としない一方で、数十年から百年単位という建築物の寿命に見合う耐久性や、全ての吊りボルトに挿入する必要があることに対する施工性、数百 Hz 以上の振動数を対象として検討されてきた従来のメタマテリアルと異なり、数十 Hz 程度の低い振動数を対象とすることなどの技術的な挑戦もある。

3. 発現効果

本研究で開発中のメタマテリアル構造を図-6に、数値解析と実験による振動伝達率のグラフを図-7に示す。

重量床衝撃音の振動数帯域において入力した音・振動が、最大で-20dB程度低減する効果が得られることが確認されている^{7)~10)}。重量床衝撃音に起因する音・振動の伝搬経路はいろいろと考えられるが、この「床振動遮断メタマテリアル」の適用により重量床衝撃音を1/6以下に低減することができれば、コンクリート床スラブの厚さ150 mm程度の低減効果が得られる。それにより従来250~300 mm程度として設計しているコンクリート床スラブの厚さを約1/2の150 mm程度

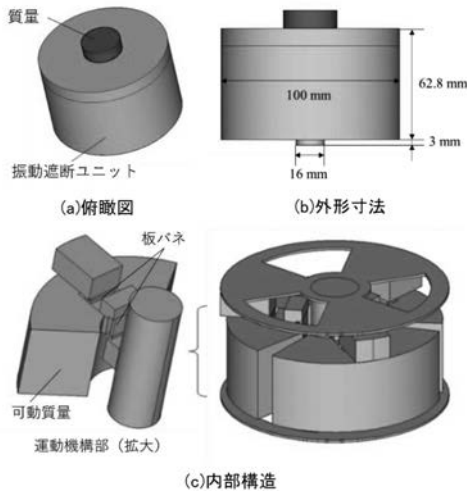


図-6 「床振動遮断メタマテリアル」の構造

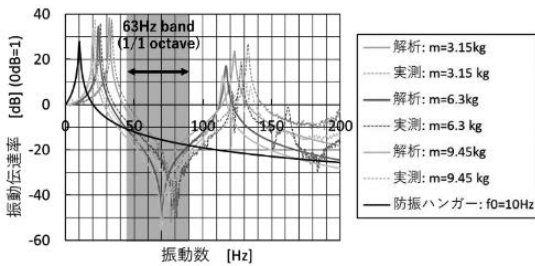


図-7 振動伝達率の解析結果および実測結果

とすることが可能となる。

また、建築物の柱や梁といった構造部材は建築物の重量に応じた地震荷重に対して断面が設計されていることから、床スラブの重量を半減し建築物の重量と地震荷重を低減すれば、これらの構造部材に用いられるコンクリート量も削減することが可能となる。

簡易な試算ではあるが、この「省コンクリート設計」により建築物全体でのコンクリート使用量を25%程度削減できる可能性がある。このような現場施工されるコンクリートの使用量削減は、関連する運搬車両の削減や工期の短縮による建設現場からのCO₂排出量の削減効果も期待できる。

他方、脱炭素社会実現に向けての動きの中で木質構造の大型建築物が増加しているが、木造床の場合、重量床衝撃音の遮断性能がコンクリート床スラブと比較して低く、居住性能の確保が一層大きな課題となっている。本技術を適用して重量床衝撃音に関する課題を解消することで、今後の木

造建築の普及と再生可能資源の活用推進によっても、脱炭素社会の実現に寄与する。

「床振動遮断メタマテリアル」の生産に目を移すと、その設計を高度にデジタル化することにより、与条件や要求性能を与えることで最適な形状を自動で作りに上げることが可能となり、設計工数の削減、その他の音・振動問題への容易な応用が進むという利点も挙げられる。また、全国にある3Dプリント工場との提携により、設計や改良の一元管理や、建設現場に近い現地での生産が可能となる。

このような設計・施工段階のDXの高度化(図-8)から、高効率な建材提供と運輸による環境負荷の低減が実現できる。

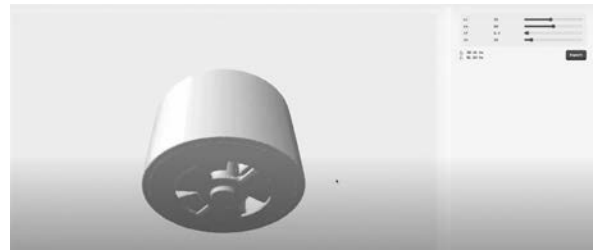


図-8 メタマテリアル設計のDX画面

以上のように、CO₂排出量の削減などによる脱炭素社会実現への貢献に加え、省労働力化による建設労働力不足解消への貢献、軽量化による耐震性能の向上と国土強靱化推進への貢献など、建設

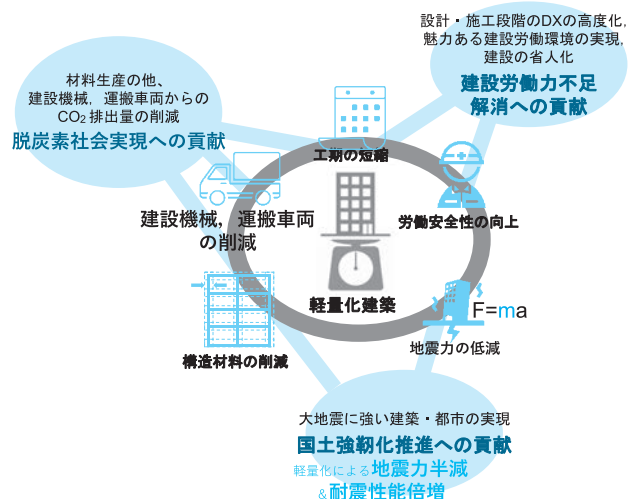


図-9 本技術の建設業界への波及効果

業と関連の深い国家的課題の解決に寄与し（図9）、魅力ある建築、都市の創造につながるという点で意義のある研究である。

4. 課題と今後の方針

本研究は、単体試験結果とDXについて当初の期待を満足する成果を得られている一方で、現場適用時の性能が不十分である。現場適用に求められる施工条件・運用条件を明らかにし、期待されるCO₂排出量削減などの効果を得る方針である。

また、前述した施工条件などの別アプリケーションへの適用も併せて検討していく。

5. おわりに

本稿では、3DPC、愛媛大学、竹中工務店で進める国土交通省SBIR建設技術研究開発助成制度令和3年度採択技術「コンクリート床スラブの厚さを半減する環境配慮型『床振動遮断メタマテリアル』の開発」について概要を解説した。

また本技術は、本プログラムの他、JAXA（国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構）が主導する革新的将来宇宙輸送システム研究開発プログラムでも応用されており、応用範囲が広いことが特徴の新技术である。自動車・プラント・船舶・土木建築・航空宇宙・防衛産業など幅広く応用が期待できる技術であるため、ご興味がある方はぜひご相談いただきたい。

【参考文献】

- 1) Left-handed metamaterials, D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, R. Shelby, S. C. Nemat-Nasser, N. Kroll and S. Schultz, in Photonic Crystals and Light Localization, ed. C. M. Soukoulis, (Kluwer, Netherlands, 2000)
- 2) Controlling Electromagnetic Fields, J. B. Pendry, D. Schurig, D. R. Smith et.al, Science, 23 Jun 2006, Vol. 312, Issue 5781, pp. 1780-1782
- 3) 振動透過抑制可能な複合材ラティス構造, 船場海斗, 水上孝一, 古賀洋一郎, Conference on 4D and Functional Fabrication 2020
- 4) Experiments on Seismic Metamaterials: Molding Surface Waves, S. Brûlé, E. H. Javelaud, S. Enoch, S. Guenneau, Physical Review Letters, 04. 2014
- 5) Metamaterials for groundborne vibration absorption in pillars, G. Aguzzi, A. Colombi, V. Dertimanis, E. N. Chatzi, Preliminary proceedings of ISMA2020 and USD2020
- 6) Inertial amplified metamaterial for vibration isolation, R. Zaccherini, A. Colombi, A. Palermo, V. K. Dertimanis, E. N. Chatzi, Preliminary proceedings of ISMA2020 and USD2020
- 7) 反共振を利用した振動遮断手法による重量床衝撃音対策技術に関する研究, 松下仁士, 佐藤恭章, 水上孝一, 三浦一幸, 古賀洋一郎, 松永裕樹, 2022 建築学会梗概
- 8) 反共振を利用した振動遮断手法による重量床衝撃音対策技術に関する研究-その2 天井試験体における振動遮断性能-, 松下仁士, 佐藤恭章, 水上孝一, 三浦一幸, 古賀洋一郎, 村山広樹, 松永裕樹, 2023 建築学会梗概
- 9) Reduction of heavy impact sound on floor slab by using mechanical metamaterial, Matsushita, H., Mizukami, K., Koga, Y., Matsunaga, H., Satou, Y., and Miura, k., Proceedings of ISMA 2022 and USD2022
- 10) Design and additive manufacturing of elastic metamaterials with 3D lever-type inertial amplification mechanisms for mitigation of low-frequency vibration, K. Mizukami, R. Imanishi, H. Matsushita, Y. Koga, Results in Engineering 20, (2023), 101389.