天井板振動のアクティブ制御による重量床衝撃音の低減

REDUCTION OF HEAVY-WEIGHT FLOOR IMPACT NOISE BY ACTIVE CONTROL OF CEILING VIBRATION

中尾哲也 ——*1 陶山大志 ——*2

Tetsuya NAKAO ——*1 Hiroshi SUYAMA ——*2

キーワード：
重量床衝撃音, アクティブ制御, 天井

Keywords:
Heavy-weight floor impact noise, Active control, ceiling

Reduction of heavy-weight impact noise was made by the active control of ceiling vibration. Experiment was carried out with a small concrete box (internal dimension: 80×80×80cm) with plywood floor and hardboard ceiling. The vibration acceleration level of the ceiling was decreased by 10 dB and the floor impact noise level by 6 dB by the control system. Furthermore, the floor impact noise level by footstep was decreased by 4 dB.

1. はじめに

上階で発生した音が下階に伝わる床衝撃音は、大きな社会問題となり、これに対して数々の低減策が開発されてきた。この内、ハイヒール歩行や家具の音により発生する軽量床衝撃音は緩衝材を利用した床材の開発により制御できる。これに対し、素足歩行や子供の走り回り・飛び跳ねにより発生する重量床衝撃音は、低減が困難で、鉄筋コンクリート造建築物では床スラブ厚を増加させることが決定的な方法であると集約される。その他の構法では、重量床衝撃音の低減は困難で、様々な改善策が開発されているものの、実質的に満足な状況(LH-55)には到達していない。これらの改善策は主に、床の高剛性化、遮音天井の導入といったパッシブな方法であり、その手法が、現時点で、限界であるならば、近年、研究の進展の著しいアクティブ制御を試みる価値が増大していると考えられる。床衝撃音研究においても、従前より、下室空間の音をスピーカーにより消音する試みが続けられており¹⁾、この方面の更なる進展が望まれる。本研究ではこれに対し、下室の天井をアクティブに制振することで、床衝撃音の低減を図ることを目標とした。この研究の前提として、下室の音を音で打ち消す手法の場合、部屋の大きさや家具・人間の配置状況により音場が異なることから、

実用に困難な点があるが、天井板を制振して音が減少する場合この点でのメリットがある。さらに、ここで目標とした実用上満足すべき床衝撃音のレベルでは、天井板からの放射が支配的であることが分かっている。また、重量床衝撃音の特性は、音源の性質によらず、床構造により実質上決まるので、いつも同様の音が発生すること、また、周波数の低い単純な音であること、等、技術上有利な点がある。これまで、小型音響箱による極めて小規模な前駆的な結果を得たが²⁾、本報では、同様の装置により素足歩行音の低減にも成功したので、重量床衝撃音の低減に関する研究として発表する。

図1 実験装置

*1 島根大学総合理工学部 教授・農博
(〒690-8504 松江市西川津町1060)

*2 島根大学農学部 学部生

*1 Prof., Faculty of Science and Engineering, Shimane University, Dr. Agr.

*2 Undergraduate Student, Faculty of Agriculture, Shimane University

2. 実験方法

実験は、図1に示すような装置で行った。内寸80×80×80 cmの上部に開口部を持つコンクリートの箱を用いた。下階天井には厚さ12 mmのハードボードを使い、上階床板には厚さ5.5 mmの合板を用いた。また、実際の歩行音の場合は上階床板を厚さ12 mmの合板とした。上階床板に加えられた衝撃を、上階床板の加速度ピックアップが検知し、この信号を外部トリガーとして、あらかじめ、制振用にプログラムされた波形を、任意波形発生装置が出力する。この出力を増幅して、下階天井を振動させ、上階床板から伝搬した衝撃音の制振を行った。制御を行った場合の天井板の振動と下階の音をそれぞれ、加速度ピックアップとマイクロフォン (dB (A) で収録) で検知した。衝撃力は、10～200 mmの高さから、テニスボールを落下させることにより発生させた。周波数分析結果については、オクターブバンドの結果を表示するのが一般的であるが、本報では実際の建物と共振周波数が異なり、また、共振の具合を良く見るため、パワースペクトルそのものを表示している。そのため、音圧レベルの低減も主要な共振ピーク (約90 Hz) 及びdB (A) のオーバーオール値に着目して考察している。

3. 結果と考察

3.1. 発生させる任意波形について

本システムにおいても、任意波形発生装置により発生させた電気信号は、駆動系の特性があるため、天井板に生じる波形と異なる。そこで、制振するために必要な波形についての検討を行った。まず、任意波形発生装置で単純な矩形波 (ステップ関数) を発生させ、それに対する天井板の振動を測定し、両者の間の伝達関数 $g(t)$ を求めた。そこで、テニスボールを落下させ、その際発生した天井板の振動加速度波形と、先に求めた伝達関数 $g(t)$ から、逆演算を行い、任意波形装置が発生すべき原波形を求めた²⁾。原理的には、上階の振動が下階天井に伝わる時間差を考慮して、この波形と正負逆の波形 (図2上参照) を出力させれば、制御できるはずである。

この波形を見ると、出力すべき波形は、実際の波形にDCを加えた比較的単純な形をしている。現システムでは、この波形を自動的に任意波形発生装置にプログラム出来ないため、波形をマニュアル入力して検討を行った。但し、予備的な検討の結果、図2下に示すように、最初の周期の振幅を小さくし、また、4周期目以降は振幅を暫減させる波形を用いた場合、良好な結果が得られた。

3.2. 制御の効果

まず、図2のような波を出力させ、制振を試みた。この時の落下高さ35 mmにおける、制御無し及び制御ありそれぞれの、下階天井板の振動加速度レベル及び下階の音圧レベルの結果を図3、図4に示す。制御なしの振動及び音は共振周波数90 Hzの次第に減衰する単純な波である。これは、周波数こそ違うものの、実大建物の重量床衝撃音の結果に類似した波であり、今回、テニスボールを用いたことの妥当性を示すものと考ええる。制御の結果、天井板の振動加速度レベルで10 dBの減少が見られた。系の伝達特性を考慮すれば、天井板の振動は殆ど打ち消すことが可能であると考えられる。しかしながら、下階の音圧レベルについては、オーバーオール値 (図中右端の<印参照) で2 dBの低下にとどまっている。

図2 天井板の振動を打ち消す波形
(上図の振幅スケールは任意、下図の振幅スケールは1目盛り0.0412Vでパワーアンプで10倍に拡大)

図3 天井板振動の振動加速度レベルの制御効果

図4 下階音圧レベルの制御効果

図6 天井板振動の振動加速度レベルの制御効果

そこで、天井板の振動を打ち消すことから、さらに進んで、発生する下階の音と逆の位相の振動を発生させることを試みた。今回の制御に用いた波形を図5に示す。図2と比べ、位相を2周期目以降の位相を2ms程度遅らせ、さらに振幅を大きくした。落下高さ65mmの場合、下階天井板の振動及び下階の音圧レベルの結果を図6及び図7に示す。振動加速度レベルは3dBの減少にとどまっているものの、音圧レベルは5dBの低減を示し、1ランクの低減に成功した。但し、下室全体の制御効果については、本実験では検討しておらず、今後、実寸における空間全体での制御効果について更なる検討が必要であろう。

図5 天井板に逆位相の振動を発生させる波形

図7 下階音圧レベルの制御効果

3.3 実用への可能性について

ここで、上記、振動を打ち消す波を用いる方法、及び、逆位相に近い振動を発生させる波を用いる方法両者について、テニスボールの落下高さを10～200mmに変え、様々な大きさの音に対し、低減の効果が得られるかを検討した。制御の無い場合に対する、振動加速度レベル及び音圧レベルの低減量を落下高さに対して表した結果を図8に、その際の下階の音圧レベルを図9に示す。振動を打ち消すだけの方法では、天井板の振動加速度レベルが最大の低減を示した際に下階の音圧レベルも最大の低減を示したが、その量は3dB程度と小さく、また、落下高さが大きくなるに従い、低減量も小さくなった。これに対し、下階の音の逆位相に近い天井板の振動を発生させた場合、落下高さ35mmで、振動加速度の低減が0dBの場合、音圧において最大の低減6dBが得られた。これは、当初の目論見通り、制御なしの場合と全く逆の位相の波形が発生した、即ち、振幅だけを見れば、差が無い場合に最大の効果が得られたと解釈できる。さらに、落下高さを上げた場合、振動加速度はさらに低減するが、音はそれほど低減しない。これは、衝撃力が大きくなり、逆位相の波から、単に振動加速度を低減させる効果に変わった

図8 ボールの落下高さを変えた際の、各制御方法による天井板の振動加速度レベル及び下階音圧レベルの低減量

と解釈できる。これらの解釈には異論もあろうが、とにかく、落下高さ200mmにおいてもなお音に対して2dB程度の低減が得られている。

また、今回検討した逆位相法では、落下高さが小さい場合かえって音は増幅される。即ち、制御する為に発生させた振動により生じた音(約6dB)がかえってうるさい場合がある。そこで、図9を見れば、この際の音圧レベルは65dBから80dBのかなり広い範囲に渡っている。実際の床衝撃音の発生状況をみれば、LH-60程度の床を想定すると、実際の足音系の音は、これより10～20dB低いことがわかっている。即ち、実際に苦情の出る音は、40～50dBの音である。これを我々の結果と重ね合わせると、約25から35dB程度の問題にならない音から、40～50dBの苦情が出る音に対し有効で、かつ、制御により音が大きくなるのは、極めて小さい音の場合との考えも成立する。また、制御を行うトリガレベルを適当に設定する方法も考えられる。また、軽量音については、床仕上げ材の緩衝効果が大きいので、その下の構造材もしくは床スラブに振動検知用のピックアップを設置すれば、重量音に対してのみの制御も可能であろう。

図9 ボールの落下高さを変えた際の下階音圧レベル

そこで、実用への一歩として、床板を12mm厚の合板とし、この上で、実際に歩行を行った場合（身長145cm，体重50kg）について、逆位相の振動を天井板に発生させ制御した場合の、下階音圧レベルの変化を図10に示す。実験には、図5の波形の3周期目を、2ms位相を遅らせた波形を用いた。32ステップのランダムな歩行であるが、4dBの低減が得られており、基準音源だけでは無く、実際の歩行について、本手法が有効であることがわかった。

図10 歩行音の下階音圧レベルの制御効果

4. 結論

この逆位相波形を発生させるアクティブ制御法は、本来のアクティブ制御とはかけ離れ、振動が検知された瞬間、決まった波形を一定の出力で出すだけの単純極まり無いものである。それだけに、現時点では、既存のパッシブな手法に加え、さらに、1ランク上の低減を目指すのに、有効な手法であると捉えている。この方法には、なお改良の余地があり、幅広い音圧レベルに対応でき、また、実際の歩行でも低減が得られたことから、今後、さらに検討を行う価値があると考えられる。

参考文献

- 1) 上明戸 昇、石丸 岳史、山下恭弘：能動制御手法を用いた床衝撃音低減に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集（環境工学 D-I），pp.211-212,1998,9
- 2) 中尾哲也、陶山大志、紙谷盛喜：天井板振動のアクティブ制御による重量床衝撃音の低減、日本音響学会 騒音・振動研究会 N-99-2，pp.1-6,1999,1

[1999年4月19日原稿受理 1999年7月27日採用決定]