木質床上で発生する衝撃力の原波形解析[†]

中 尾 哲 也* 田 中 千 秋** 高 橋 徹**

Source Wave Analysis of Impact Force on Wood Based Panel Floor

by

Tetsuya NAKAO*, Chiaki TANAKA** and Akira TAKAHASHI**

Source wave analysis technique was applied to analyze the impact forces on wood based panel floors. The peak level and contacting interval of the source wave at impact points were evaluated for the plywood floor and also for the floors finished with two different materials, a vinyl-chloride sheet and a needle point carpet. In the case of the plywood floor, the impact forces by flexible bodies, such as rubber shoes stepping and rubber ball dropping, have almost the same characteristics as those in the case of concrete slab floors. The characteristics of impact force on the plywood floor by rigid bodies, such as high-heeled shoes stepping and mini-tapping machine impact, differ from those on the concrete slab floors. The finish materials lengthen the contacting intervals for the rigid body impact in the order of vinyl-chloride sheet and needle point carpet, although they have no influence on the contacting interval for the flexible body impact.

Key words : Wood based panel floor, Source wave analysis, Impact force

1 緒 言

木材表面の力学的性質は、木材が人間または他の材料と接触する場合に重要な意味を持っている。表面弾性は人間の歩行時の衝撃感、フローリング上に物体が落下したときの物体の破損や表面の圧痕の程度と関連しており、実用上も重要な意味を持っている。

本研究は、木造住宅の床衝撃音を低減する研究の一環として、金属落下、運動靴歩行、ハイヒール歩行等による木質床への衝撃力についての定量的な知見を得るものである。すなわち、木材および測定機器の弾性波伝達特性を求める原波形解析手法を適用し、衝撃地点での波形を再現してその衝撃力の大きさや接触時間を求め、合板床上での各衝撃源の特性および床仕上げ材料の緩衝効果について検討した。

2 実験および解析方法

2・1 実験材料

木質床は Fig. 1 に示した合板床パネル (15 mm 厚5 プライ、枠材: ベイマツ) を用い、床仕上げ材料としては塩化ビニルシートおよびニードルパンチカーペットを用いた。測定系の較正用衝撃源としてパチンコ玉 (重さ 5.45 g, 直径 1.1 cm) を用いた。機械的模擬衝撃力としてはゴムマリ、および、ミニタッピングマシンを用いた。人間の衝撃力は運動靴歩行およびハイヒール歩行で与えた。

2・2 実験装置および方法

実験は Fig. 2 に示した装置で行った。規準衝撃力で

Fig. 1. Wood based panel floor.

あるパチンコ玉は被衝突体である木質床上方 30 cm から落下させ、ミニタッピングマシンは上方 8 cm から落下させた。ゴムマリは木質床に投げつけた。人間の衝撃力である運動靴歩行、ハイヒール歩行の場合は、木質床の衝撃点を踏むものである。

計測機器としては、検出器として B & K 社の加速度ピックアップ (共振周波数 55 kHz, 16.5 kHz まで ±10% 内でフラット特性) および増幅アンプを用いた。衝撃源からピックアップの距離は 15 cm とした。ピックアップは瞬間接着剤により木質床に接着した。分析機器としてフーリエ変換および逆フーリエ変換の

[†] 原稿受理 昭和62年7月31日 Received July 31, 1987

* 正 会 員 島根大学農学部 松江市西川津町, Faculty of Agriculture, Shimane University, Nishikawatsu-cho, Matsue

** 島根大学農学部 松江市西川津町, Faculty of Agriculture, Shimane University, Nishikawatsu-cho, Matsue

Fig. 2. Schematic diagram of apparatus.

機能を持つ, NEC 三栄社のシグナルプロセッサ 7T17S (サンプリング時間 $30 \mu\text{s}$, 解析周波数 10 kHz , 1 KW 長, ハニングウインドウ)を用いた。ここで用いた機器は, 既発表の論文で用いたもの同一の機器である。

2・3 解析方法

媒体および変換子より成る系の原波形伝達特性を求める方法として, 実験的に媒体および変換子の応答関数を求める方法がある。すなわち, 時間領域において

$$h(t) = g(t) * f(t) \quad (1)$$

あるいは周波数領域において

$$H(\omega) = G(\omega) \cdot F(\omega) \quad (2)$$

なる関係を用いる。ここに $h(t)$ は出力電圧, $g(t)$ は媒体および変換子を一括した応答関数, $f(t)$ は原波形, $*$ はたたみこみ積分を表す。また $H(\omega)$, $G(\omega)$, $F(\omega)$ は, それぞれ $h(t)$, $g(t)$, $f(t)$ にフーリエ変換を施したもので, 特に $G(\omega)$ はいわゆる伝達関数である。本解析においては, フーリエ変換および逆フーリエ変換の機能を内蔵した解析機器を用いているため代数的な関係を持つ式(2)を用いて計算を行った。

式(2)の測定系の伝達関数 $G(\omega)$ は以下のようにして求めた。まずパチンコ球を落下させ, その衝撃力の時間軸波形と周波数スペクトルを測定する, ここで, このパチンコ球落下の原波形 $f_0(t)$ は既に約 $300 \mu\text{s}$ の間に数 10 —数 100 N の荷重解放を伴う正弦波状の関数であることが分かっている¹⁾³⁾ので, この原波形 $f_0(t)$ と先に求めた検出器により得られた出力波形 $h_0(t)$ をそれぞれフーリエ変換し, $F(\omega)$, $H(\omega)$ を計算すれば式(2)より伝達関数 $G(\omega)$ が求まる。 $G(\omega)$ が求まれば実際に落下試験を行い, 得られた出力波形 $h(t)$ にフーリエ変換を施し, 式(2)より周波数スペクトル $F(\omega)$ を求め, また, これに逆フーリエ変換を施して原波形 $f(t)$ を求める。

その際の衝撃力の較正は次のようにして行った。規

準衝撃源であるパチンコ球の落下試験により得られた原波形より力積 $f\Delta t$ は次のように求まる。すなわち波形を正弦曲線の半周期として

$$f\Delta t = 2/\pi \Delta F \cdot \Delta T \quad (3)$$

ここに ΔF は原波形のピーク値, ΔT は時間幅である。一方これとは別にパチンコ球の落下高さ h , 跳ね返り高さ h' およびパチンコ球の質量 m より次のように力積が求まる。

$$f\Delta t = m\sqrt{2g}(\sqrt{h} + \sqrt{h'}) \quad (4)$$

ここで, 式(3)および式(4)それぞれより求める力積の値が等しいとして, 原波形のピーク値 ΔF を決定したところ, その値は 90 N であった。また, ΔT の値は, 前述の通り $300 \mu\text{s}$ とした。

3 結果と考察

3・1 合板床上で発生する衝撃波形

運動靴歩行, ゴムマリ落下, ハイヒール歩行, タッピングマシンの検出波形, 原波形の実験結果を Fig. 3 ~ 6 に, 原波形の周波数スペクトルを Fig. 7 に示す。原波形はいずれの場合も衝撃力のピークが明確に求まっている。接触時間は, 運動靴歩行が約 6.4 ms , ゴムマリ落下が約 5.7 ms , ハイヒール歩行が約 1.4 ms , タッピングマシンが約 1.6 ms である。運動靴歩行とゴムマリ落下, ハイヒール歩行とタッピングマシン

Fig. 3. Detected wave (a) and source wave (b) for rubber shoes walking on plywood finish floor.

Fig. 4. Detected wave (a) and source wave (b) for rubber ball dropping on plywood finish floor.

Fig. 5. Detected wave (a) and source wave (b) for high-heeled shoes walking on plywood finish floor.

Fig. 6. Detected wave (a) and source wave (b) for mini-tapping machine impact on plywood finish floor.

ンの接触時間はそれぞれほぼ同等である。衝撃力のピーク値は運動靴歩行が約 220 N、ゴムマリ落下が約 102 N、ハイヒール歩行が約 320 N、タッピングマシンが約 450 N である。つぎに、周波数スペクトルについて検討する。従来の結果では、ハイヒール歩行、タッピングマシンの周波数スペクトルは高周波成分に富み、運動靴歩行、ゴムマリ落下の周波数スペクトルは低周波成分が多いとされているが、Fig. 7 に示した本実験での結果は、これとは逆に運動靴歩行およびゴムマリ落下の方が高周波数成分の多い傾向を示す。しかしながら、これらの周波数スペクトルの 400 Hz での各成分は、運動靴歩行、ゴムマリ落下は約 20 N、ハイヒール歩行、タッピングマシンは約 250 N であり、先に述べた衝撃力のピーク値と比べ、本周波数域での成分は、運動靴歩行、ゴムマリ落下ではほとんど無視できる程である。すなわち従来の知見と本実験での結果が異なるのは、運動靴歩行、ゴムマリ落下で本周波数範囲より低い周波数での衝撃力の成分が大きいからである。この点については後に考察する。

ここで疑似音源として用いたゴムマリ落下、タッピングマシンの衝撃力について考察する。佐道ら³⁾によれば、衝突体の剛性が被衝突体の剛性より低い場合、その衝撃力は被衝突体に影響されず衝突体の剛性に影響される。また衝突体の剛性が被衝突体の剛性より高い場合は、その衝撃力は被衝突体の剛性に影響される。そこで、剛性の低い衝突体の場合について既存のコンクリート床での結果と本実験の合板床での結果と比較する。すなわち、安岡⁴⁾、木村ら⁵⁾によるタイヤのコンクリート上への落下について検討する。ここで先に述べたように、ゴムマリとタイヤの剛性は、ほぼ等しいものであり、両方とも被衝突体より剛性が低いため、衝撃力は被衝突体に影響されないと考えられる。安岡によるコンクリート平滑面上へのタイヤ落下においての接触時間は 21 ms である。ここで合板床上へのゴム

(a) Rubber shoes walking; (b) Rubber ball dropping; (c) High-heeled shoes walking; (d) Mini-tapping machine impact.

Fig. 7. Frequency spectra for various impact forces on plywood finish floor.

マリ落下においての接触時間は 5.7 ms であるが, さらに低レベルでの波形を考慮して接触時間をみってみると 11 ms で, ほぼ同様である. また安岡による大人歩行のピーク衝撃力は, およそ数 100 N , 合板床上への運動靴歩行のピーク衝撃力も約 220 N とほぼ同様であった. つぎに木村らによるコンクリート上へのタイヤ落下時の周波数解析の結果を Fig. 8 に示す. この周波数スペクトルの 400 Hz 以上の周波数について見てみると, Fig. 7 の合板床上へのゴムマリ落下の周波数スペクトルとはほぼ同様であることがわかる. よって, ここでの実験システムは信頼できるものであり, また, 本周波数スペクトルより低い周波数成分についての知見も, コンクリートでの結果を用いれば良いと考えられる.

Fig. 8. Frequency spectrum for tire drop impact on concrete slub floor according to Kimura⁵⁾.

タッピングマシンにおいては, 被衝突体の剛性より, 衝突体であるタッピングマシンの剛性が高い. よって衝撃力は被衝突体に影響される. そのため, 上記のコンクリート床での結果は, 本実験での合板床上での結果とは比較できないと考えられる. 安岡によるコンクリート平滑面上でのタッピングマシンの衝撃時間は, 0.25 ms で, 合板床上での衝撃時間は 1.6 ms であった. このように, 両床材料間の接触時間には大きな相違がある. また, コンクリート平滑面上でのピーク衝撃力は, 3600 N であるのにたいし, 本実験でのピー

ク衝撃力は, 450 N と小さい. このようにタッピングマシンでは, 床の性状の違いにより, 衝撃力の特性が異なる.

3・2 各床仕上げ材料上で発生する衝撃波形

前述の合板床パネルに塩化ビニルシート仕上げとした場合の運動靴歩行, ゴムマリ落下, ハイヒール歩行, タッピングマシンの原波形を Fig. 9~10 に, またその周波数スペクトルを Fig. 11 に示す. 原波形より接触時間は運動靴歩行が約 5.6 ms , ゴムマリ落下が約 5.4 ms , ハイヒール歩行が約 2.1 ms , タッピングマシンが約 1.8 ms である. 衝撃力のピーク値は, 運動靴歩行が約 130 N , ゴムマリ落下が約 100 N , ハイヒール歩行が約 300 N , タッピングマシンが約 410 N である. 周波数スペクトルの結果は, 先の合板床の場合と,それほど大きな違いはなく, これは床衝撃音に関する知見と一致する.

同様にニードルパンチカーペット仕上げとした場合の運動靴歩行, ゴムマリ落下, ハイヒール歩行, タッピングマシンの原波形を Fig. 12 ~ 13 にまたその周波数スペクトルを Fig. 14 に示す. 原波形より接触時間は運動靴歩行が約 5.9 ms , ゴムマリ落下が約 5.5 ms , ハイヒール歩行が約 3.0 ms , タッピングマシン

Fig. 10. Source waves for high-heeled shoes walking (a) and mini-tapping machine impact (b) on vinyl-chloride sheet finish floor.

Fig. 9. Source waves for rubber shoes walking (a) and rubber ball dropping (b) on vinyl-chloride sheet finish floor.

(a) Rubber shoes walking; (b) Rubber ball dropping; (c) High-heeled shoes walking; (d) Mini-tapping machine impact.

Fig. 11. Frequency spectra for various impact forces on vinyl-chloride sheet finish floor.

Fig. 12. Source waves for rubber shoes walking (a) and rubber ball (b) on needle point carpet finish floor.

Fig. 13. Source wave for high-heeled shoes walking (a) and mini-tapping machine impact (b) on needle point carpet finish floor.

が約 3.2 ms である。衝撃力のピーク値は、運動靴歩行が 190 N、ゴムマリ落下が 130 N、ハイヒール歩行が 260 N、タッピングマシンが 240 N である。周波数スペクトルについて見ると、運動靴歩行およびゴムマリ落下の周波数スペクトルは 3・1 節に示した結果とほぼ同様であるが、ハイヒール歩行およびタッピングマシンの周波数スペクトルについて見ると、前記の 2 種類の床上では数千 Hz まで衝撃力の成分があったのに対し、カーペット仕上げの場合は約 1000 Hz 以後の衝撃力の周波数成分はほとんど見られない。

ここで、これまでの実験結果をまとめて、運動靴歩行、ゴムマリ落下、ハイヒール歩行、タッピングマシンの各床仕上げ面での接触時間および衝撃力のピーク

(a) Rubber shoes walking; (b) Rubber ball dropping; (c) High-heeled shoes walking; (d) Mini-tapping machine impact.

Fig. 14. Frequency spectra for various impact forces on needle point carpet finishing floor.

値を Table I に示す. Table I より, タッピングマシン衝撃の場合は, 合板床, 塩化ビニルシート, ニードルパンチカーベットの順で接触時間が長くなるのに伴い衝撃力のピーク値が減少している. これは 3・1 節で考察したように, タッピングマシンの剛性が被衝突体の剛性より高いため, その衝撃力は, 被衝突体に影響されることによるものである. また, 同様に, コンクリートより剛性の低い合板床上への衝突においては, 接触時間が長くなり, 衝撃力のピーク値が減少したことに対応している.

Table I. Contacting intervals and peak impact forces of different finish materials.

(a) Contacting intervals (ms).

	Impact source			
	Rubber shoes	Rubber ball	High heeled shoes	Tapping machine
Plywood floor only	6.4	5.7	1.4	1.6
Vinyl-chloride sheet	5.6	5.4	2.1	1.8
Needle point carpet	5.9	5.5	3.0	3.2

(b) Peak impact forces (N).

	Rubber shoes	Rubber ball	High heeled shoes	Tapping machine
Plywood floor only	220	100	320	450
Vinyl-chloride sheet	130	100	300	410
Needle poing carpet	190	130	250	240

運動靴歩行およびゴムマリ落下については, Table I より各仕上げ面での接触時間, 衝撃力のピーク値はほぼ一定の値であった. これは塩化ビニルシート, ニードルパンチカーベットの緩衝効果が無かったことを意味する. これは, 先に述べたようにゴムマリの剛性が被衝突体の剛性より低いことが原因と考えられる.

したがって, これらの解析の結果より, 従前より知られている木質床衝撃音の床仕上げ材料による相違は, その衝撃力特性の相違によるものであることが分かった. すなわち, 本研究で用いた原波形解析手法は, 衝撃力特性についての定量的な知見を得るのに有効な手段であると考えられる.

4 結 言

原波形解析手法を適用し, 合板床, その上に床仕上げ材料として塩化ビニルシート, ニードルパンチカーベットの置いた場合について, 運動靴歩行, ハイヒール歩行およびその模擬音原として, ゴムマリ落下, タッピングマシンの衝撃地点での波形を再現し, その衝撃力の大きさおよび接触時間を求めた.

その結果, 被衝突体に比較して剛性の低い運動靴歩行, ゴムマリ落下ではその衝撃力は被衝突体の変化, すなわち床仕上げ材料の影響を受けないことが分かった. この場合, 合板床の結果であるピーク衝撃力および接触時間は, 既存のコンクリート床の結果とほぼ一致した. これに対し剛性が高いハイヒール歩行およびタッピングマシンでは, 被衝突体の剛性によって衝撃力が異なる. すなわち, 合板床の場合とコンクリート床の場合の衝撃力特性は大きく異なることが分かった.

また, 合板床の上に, 床仕上げ材料である塩化ビニルシート, ニードルパンチカーベートを合板床上に置くと, 運動靴歩行およびゴムマリ落下ではその緩衝効果は見られなかったものの, タッピングマシンおよびハイヒール歩行の衝撃力については, ピーク値が減少し, 接触時間は長くなり緩衝効果が認められた. その効果は, 塩化ビニルシートよりニードルパンチカーベットの方が大きい. これらの結果は, 従来の床衝撃音の知見と一致する.

本研究に当たり島根大学農学部林学科木材加工学専攻生久野守氏(現在出雲木工)の協力を得たここに深謝の意を表する. また, この研究は昭和 62 年度文部省科学研究費補助金奨励 (A) [61760144] の援助を得て遂行したものであることを付記する.

参 考 文 献

- 1) 中尾哲也, 田中千秋, 高橋 徹, 木材学会誌, **32**, 591 (1986).
- 2) 中尾哲也, 繊維学会誌, **43**, 637 (1987).
- 3) 佐道 健, 中島孝雄, 大平 章, 木材学会誌, **29**, 8 (1983).
- 4) 安岡正人, 音響技術, **6**, 267 (1977).
- 5) 木村 翔, 井上勝夫, 前田浩文, 日本建築学会大会講演梗概集, p.59 (1986).