木造床の鉛直振動特性に及ぼす人間荷重の影響に関する実験的研究 (第1報)

EXPERIMENTAL STUDY ON EFFECT OF HUMAN-LOAD
ON VERTICAL DYNAMIC CHARACTERISTICS OF WOODEN FLOOR (PART 1)

鈴木秀三*, 藤野栄一**, 野口弘行***

Shuzo SUZUKI, Eiichi FUJINO and Hiroyuki NOGUCHI

Impact hammer tests were conducted to demonstrate the effect of human load on vertical vibrational characteristics (first natural frequency and damping factor) of wooden floors. The specimen was a 6.5m-long-span and 1.0m-wide wooden floor consisted of two 120mm wide and 300mm deep laminated wood timbers and 21mm-thick plywood sub-floor. The support and live load conditions of the specimen were changed. The live load combined with human load and furniture load ranged from 0 to 60 kg/m² respectively were applied to the wooden floor.

The test results indicate, i) Human load hardly affects the first natural frequency of the wooden floor, ii) The value of damping factor at first natural frequency increases in proportion to the rate of human load over the weight of a wooden floor, iii) The measured first natural frequencies of the wooden floors coincide with those calculated according to the vibration theory for bending continuous model with the bending stiffness and the weight (the sum of dead load and furniture load except the human load) of the wooden floor.

Keywords : Wooden floor, Vertical vibration, Dynamic characteristics, Human load, Furniture load

木造床, 鉛直振動, 振動特性, 人間荷重, 物品荷重

1. はじめに

木質構造における床の面外変形・振動については, 日本建築学会「木質構造設計規準・同解説」¹⁾の「5. 部材の設計 504 曲げ材」で規定される「曲げ材の所要剛性」によるところが一般的である。平成 14 (2002) 年には同規準の改定が行われ, 「通常の場合: 梁の類」については, 従前「初期変形における最大たわみがスパンの 1/300 以下, かつ, 2cm 以下」であったものが, 「初期変形における最大たわみがスパンの 1/300 以下, かつ, 振動障害がないこと」と改められた。

従前の「最大たわみ量 2cm 以下」の根拠は, 木質構造設計規準の解説によれば, 昭和 19(1944) 年に発表された竹山・久田の研究²⁾に基づくもので, その誘導は次の仮定に基づいたとされている。

①床梁の固有振動数は曲げ振動理論に基づくものとし, 床梁を単純梁とみなす。

②梁の最低の振動数を 10Hz 程度とする。

③床板・根太の影響や仕口拘束などによる振動数の増大を見込む (増大率を α と定義)。

④床上に人が多勢のっている場合の振動は減衰してかえって感じなくなるので, 荷重 w の中から人間荷重を除外する (通常用いる床の

設計荷重と固定ならびに物品荷重の和との比を β と定義)。

⑤所要の振動数 n_e を, 事務所・教室については $n_e = 9 \sim 10\text{Hz}$, 倉庫については $n_e = 5\text{Hz}$ 程度とする。この場合, α は 1.2 程度, β は荷重の性質を勘案して用途別に定める。

⑥曲げ振動理論に基づく梁の振動周期式中の EI と静的等分布積載時のたわみ式の EI とを関連づけて, 事務所・教室・倉庫それぞれの場合についてたわみ限度を誘導し, 得られた 3 式を大観して, $\delta \leq 2\text{cm}$ を誘導する。

以上のように, 旧規準の「最大たわみ量 2cm 以下」は, 事務所・教室・倉庫など比較的大規模な木造建築物でスパンが 6m を超える梁の振動障害を防ぐための一つの目安として定められたものであったといえよう。これに関連して, 住宅の居室の最大たわみ量について, 飯塚は α, β をそれぞれ 1.5, 0.8 とおいて $\delta \leq 0.65\text{cm}$ を誘導し, 住宅の床梁について「最大たわみ量 0.7cm 以下」で設計することを提案している³⁾。

上述の木造梁の振動障害対策に関する規定は簡便である反面, 規定値の誘導根拠となる与条件が固定化されており, 建物の用途・要求性能・構法変化に柔軟に対応できず, したがって, 設計者が要求

* 職業能力開発総合大学校建築工学科 教授・工博

** 職業能力開発総合大学校東京校建築科 講師・修士(工学)

*** 明治大学理工学部建築学科 教授・工博

Prof., Dept. of Architectural Engineering, The Polytechnic University, Dr. Eng.

Lecturer, Dept. of Architecture, Tokyo Institute Polytechnic University, M. Eng.

Prof., Dept. of Architecture School of Science & Technology, Meiji Univ., Dr. Eng.

性能を勘案して振動特性値を決定することには適していない。また、集成材・単板積層材 (LVL)、合板・構造用パネル、木質複合 I 型梁などを始めとするエンジニアリング・ウッド (Engineering Wood) の出現により、木質構造による大スパン大規模建築が可能になっている。さらには、木材の使用促進が二酸化炭素の削減、地球温暖化防止に貢献できることと相俟って、従来のような住宅を代表とする低層小規模建築物だけでなく、住宅以外の用途をもつ中層建築物実現の可能性を探る動きも出てきており、このような比較的スパンが大きな木造床については経験が少ないことも相俟って振動障害の発生が懸念される状況となってきた。

一方、建築物の居住性能評価の観点から、日本建築学会「建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説 (1991 年)」⁴⁾ が制定され、建築物床の鉛直振動性能は、床の応答波形から求められる振動数・振動振幅・減衰定数に基づき評価されることになっていた。この指針に関しては、一般的な木造床仕様では「ランク外」と評価されること⁵⁾ もあり、木造床の高減衰性能を視野に入れた評価軸の提案⁵⁾、比較的軽量な床を対象とした床振動の測定・評価法に関する提案⁶⁾ もなされてきた。同指針は 2004 年 5 月に改定され⁷⁾、床応答波形の 1/3 オクターブバンド分析結果を応答加速度、振動数および人の振動知覚確率により定められた性能評価曲線と照合して評価する方法が採用されたが、このことにより床応答波形データの蓄積あるいは床応答波形予測手法の必要性がますます高まったといえよう。

しかしながら、木質構造においては構造設計に必要な諸情報が整備されておらず、固有振動数予測手法すら確立されていないのが現状である。

このような背景から、筆者らは、旧木質構造設計規準の規定の妥当性を検証した上で、現行木質構造設計規準の目指す要求性能に応じた部材設計法を検討するための基礎データを得るために、実大木造部分床を対象とした実験的研究を実施してきたが^{8,9)}、木造床の鉛直振動特性に及ぼす人間荷重の影響について有用な知見を得たので、ここに報告するものである。本報では、木造床の鉛直振動に対する 1 次固有振動数および減衰定数に及ぼす人間荷重の影響、並びに、1 次固有振動数の推定に用いる連続体の曲げ振動理論の適用性について述べ、次報では木造床における人間荷重の応答に関する実験結果について述べる。

2. 試験体

一般的な木造床組の構成方法には単床 (根太床)、複床 (梁床)、組床があるが、これらを木質構造の構造設計手法の観点からみれば、全てが「梁の類」によって支えられる形式であると言える。木質構造においては、床の最小構成単位を 1 方向に鉛直荷重を伝達する「梁の類」とそれに連結・結合された部材類で構成されると仮定し、床組全体はこの最小構成単位が並列配置された状態として取り扱うことが通例である。また、床を構成する部材の設計においては、積載荷重が等分布荷重として作用すると仮定することが一般的である。このような背景にしたがい、実験に用いる実大部分床の構成及び載荷条件は、木質構造の複床 (梁床) の構造設計において通常仮定される状態を具現化することを念頭に置いたものとしている。

(1) 試験体の概要

試験体は、Fig. 1 に示すような床下地、根太および 2 本の梁で構成

Fig. 1 Schematic diagram of wooden floor (Type-A)

Table 1 Specification of members of wooden floors

Member	Specification
Beam	Glued laminated timber(E120-F375,JAS: Douglas Fir) Size: 120mm × 300mm, Length: 8030mm, Specific gravity: 0.53
Joist	Dimension lumber 206 (SI, 38 × 140), Specific gravity: 0.54 Metal hanger: JH206 (6-ZN40 to Beam)
Sheathing	Plywood, Thickness: 21mm (600 × 2400, 7ply, T&G) Nail: CN65 (@150 on perimeter, @200 on intermediate)

Fig. 2 Details of beam-ends and supports

される幅 1.0m、スパン 6.5m の実大部分床で、床下地である構造用合板を梁・根太に釘打ち張りしたものである。床の構成部材は Table 1 に示す通りであるが、実験は次項で述べる試験体種類 Type-A → Type-B → Type-C の順に条件を変えて行うこととしたので、部材は全試験種類を通して同一のものである。梁の断面は、室の用途を事務室・店舗の売り場・集会室等とした場合の設計条件を勘案して、長期荷重 (固定荷重 + 積載荷重) 5500 N/m^2 が作用した場合のスパン中央部のたわみ量がスパンの $1/300$ ($6500/300=21.7\text{mm}$) 以下となることを目途に決定している。なお、梁のたわみ計算に用いたヤング係数は規格値 ($E=120\text{N/mm}^2$ 、実測値は $E=137\text{N/mm}^2$) で、スパン中央部の変形量は約 19mm と計算された。

(2) 試験体の支持条件

試験体の種類は、形式と支持条件の違いにより、Type-A、Type-B、Type-C の 3 種類に分類される。各試験体タイプともに、床梁はコン

クリートスラブに固定されたH形鋼上にピン支持の治具を介して支持したが (Fig. 2 参照), この措置は床組上下方向周りの構成の影響を排除し床自身の振動性状についてだけ注目するためである。

試験体種類毎の特徴とねらいは次の通りである。

Type-A: 長さ 8.0m (実長 8.03m) の床の端部を両側に約 0.75m (実長 0.765m) づつ跳ね出した形の床の両端が自由な状態にある支持スパン 6.5m の床である。床組は支持点位置の上下に設置したピン治具を介して引き寄せボルトによりH形鋼に緊結されている。この試験体の自由な状態にある両端部を拘束した状態が Type-B である。

Type-B: Type-A の跳ね出し部分先端位置についてもピン治具により拘束したもので、床組が連続梁的に構成された状態についての振動特性を調べるための試験体である。なお、実験は積載荷重が無載荷の場合と人間重量 30 kg/m² の場合についてだけ行っている。

Type-C: Type-A の跳ね出し部分を切り落とした形の床組で、通常の構造計算で仮定される単純支持された支持スパン 6.5m の床に相当する形としたものである。

(3) 積載荷重の条件

木造床を設計する場合の積載荷重は、建築基準法施行令によることが一般的である。建築基準法施行令の数値の由来は詳らかではないが、日本建築学会建築物荷重規準案・解説 (1975 制定)¹⁰⁾ によれば、積載荷重は人間荷重と物品荷重に分類され、設計用積載荷重は人間並びに家具の平均重量に室用途に応じた集中係数・衝撃係数を乗じて決定するとしており、その値は建築基準法施行令の値と基本的に同じである。このことを踏まえ、同規準¹⁰⁾ 所載の人間及び家具の平均重量 (集中係数・衝撃係数考慮前の値: 人間 30 ~ 180 kg/m², 家具 30 ~ 70 kg/m²) と両重量の室用途別平均重量の合計 (事務室 60 kg/m², 居室 65 kg/m², 教室 110 kg/m², 商店 135 kg/m²) を参考として、実験における載荷荷重について両荷重の組合せを 0 ~ 120 kg/m² の範囲で変化させて実験を行うこととした。具体的には、人間および物品重量をそれぞれ 0, 30, 60kg/m² とし、Table 2 に示す重量の組合せで実験を行うこととした。

人間荷重の載荷方法は、運動靴を履いた人間が所定重量になるようにダミーウェイトを背負った状態 (リュックサックを使用) で支持スパン内の床面上に立つこととし、荷重条件に応じて人間 3 ~ 6 人を分布荷重の状態に近くなるように配置することとした。これは、人間の姿勢が床の減衰性に及ぼす影響について、竹山ら²⁾ が 10 種類の異なる人間の姿勢について実験を行った結果として [直立], [尻つけ], [椅子掛け], [横臥] 等の場合に床振動の減衰が非常に早いこと, [弾み立ち] の場合には振動はやや継続すること指摘している¹¹⁾ ことを参考にしたもので、高減衰状態の影響を調べるためと実験実施の簡便性を考慮した結果である。一方、物品荷重としては鋼製の錘 (約 25kg/個) を用い、荷重条件に応じて 8 ~ 16 個を支持スパン内の床組上に配置している。Fig. 3 には、人間荷重 60 kg/m² (60kg/m) ・物品荷重 30kg/m² (30kg/m) とした場合 (H60-F30) の状況が模式図として示してあるが、等分布荷重とした理由については本節の頭書に記した通りである。

(4) 床の自重と曲げ剛性

Table 3 には、静的加力実験 [H形鋼を錘 (362kg) として用いたスパン中央 1 線集中載加実験およびスパン 3 等分点 2 線集中載加実験] における、スパン中央部の変位に基づいて計算される床組の曲

Table 2 Name of live-load condition
(combination of human-load and furniture-load)

Live-load		Furniture-load : N/m ² (kg/m ²)		
Human-load : N/m ² (kg/m ²)	0(0)	0(0)	294(30)	588(60)
	294(30)	H0-F0	H0-F30	H0-F60
	588(60)	H30-F0	H30-F30	H30-F60
		H60-F0	H60-F30	H60-F60

Fig. 3 Schematic diagram of live-load at H60-F30 for Type-A

Table 3 Bending stiffness of wooden floors

Load condition	Bending-stiffness : EI (kN・m)	
	with sub-floor	without sub-floor
Mid-span loading	9462	7247
2-point loading	9297	7500
Average	9380	7374

げ剛性 (EI) が示してある。同表より、合板を釘打ち張りした床組の曲げ剛性の値は 9380 kN・m² (両実験で得られた値の平均値) で、合板を釘打ち張りすることにより曲げ剛性が約 25% 増大することがわかる。なお、床の単位長さ当たりの自重 (固定荷重) は、床組構成後の計量値に基づいて計算すると 54.5 kg/m であった。

3. 試験方法

床組の固有振動数および減衰定数を評価するための動的試験法を決定するに際し、予備実験として加振器を用いた強制加振実験とインパクトハンマー加振による自由振動実験を行い、1 次固有振動数および減衰定数について両者の結果に大きな差異がないことを確認した上で、実験実施の簡便性を考慮して、インパクトハンマー加振による自由振動実験を採用した。

加振に用いたインパクトハンマーは加振部先端にゴム製チップを取付けた重さが約 1 kg のもので、加振力はインパクトハンマー内蔵の圧電型ロードセルにより計測され、その加振力は、全試験を通して、作用時間は約 0.02 秒間、最大加振力は 500 ~ 1000 N であった。なお、床組の加振位置には厚さ 40mm のスポンジゴムを取付け、低い周波数帯域に加振力を集中させる処置をとっている。

床組の応答加速度は、床組を構成する 2 本の梁のスパン中央部および 3 等分点位置 (合計 6 点) について、サーボ型加速度計 (容量: 2G) を用いて測定した。また、各梁のスパン中央部位置の応答変位については、接触式の変位計 (容量は 5mm または 10mm, 精度は 1/2000mm または 1/1000mm) を用いて測定した。データ収録には多チャンネル信号処理装置を用い、インパクトハンマーの加振力と床組の応答加速度および応答変位の電圧信号 (約 0.1Hz で AC カップリング, 約 250Hz でアンチエイリアジングフィルタを適用) に対して A/D 変換を行っている。サンプリング周波数は時刻歴応答波形の測定について 1024Hz, 周波数応答関数については 512Hz, 測定時間は 8 秒間を基本としている。なお、周波数応答関数は、測定周波数範囲を 0 ~ 256Hz とし、各試験条件毎にインパクトハンマー加振 3 回のデータについて平均化処理を施している。

4. 実験結果とその考察

Fig. 4 には、試験体 Type-A についての、インパクトハンマー加振による自由振動に対する梁中央部の時刻歴変位応答波形が例示してある。Fig. 5 には、同じく試験体 Type-A についての、インパクトハンマーの加振力で規準化したスパン中央部加速度応答と振動数の関係、いわゆる周波数応答関数が例示してある。Fig. 5(a) ~ (c) は、人間荷重がそれぞれ 0, 30, 60 kg/m² の場合において物品荷重が 0 ~ 60 kg/m² に変化した状態を、Fig. 5(d) ~ (f) は、物品荷重がそれぞれ 0, 30, 60 kg/m² の場合において人間荷重が 0 ~ 60 kg/m² に変化した状態を、それぞれ示してある。Fig. 5 中のデータは重複表

示されているが、各グラフの縦軸の大きさが異なるため、一見別データに見えることに注意されたい。

Table 4 には、Fig. 4 に例示したような変位応答波形（時刻歴）の初期 2 ~ 4 周期分の記録に基づき、日本建築学会「建築構造物の振動実験」¹²⁾ の「2.4.2 自由振動波形の解析」に示される全振幅による算定手法にしたがって求めた卓越振動数および減衰定数の値と、Fig. 5 に例示した周波数応答関数のピークを 1 次固有振動数とし、その 1 次固有振動数のピークに対していわゆる $1/\sqrt{2}$ 法を用いて算出した減衰定数が、全試験体種類について一括表示してある、なお、同表中に示す 1 次固有振動数および減衰定数の値は、床を構成する

Fig.4 Time record on mid-span displacement for type-A

Fig.5 Frequency response functions for Type-A

Table 4 Results of vertical vibration tests (1st natural frequency and damping factor)

Load-condition			Name of test-condition	1st natural-frequency (Hz)						Damping-factor (%)					
Live-load (kg/m ²)	Human-load (kg/m ²)	Furniture-load (kg/m ²)		Type-A		Type-B		Type-C		Type-A		Type-B		Type-C	
				(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
0	0	0	H0-F0	15.1	14.9	21.2	20.5	15.7	15.3	3.5	1.8	3.5	3.5	3.4	2.2
30		30	H0-F30	12.8	12.5			12.3	12.0	3.9	2.8			4.9	4.3
60		60	H0-F60	10.5	10.5			10.5	10.5	3.6	1.8			4.0	2.8
30	30	0	H30-F0	17.9	15.3	22.6	22.1	16.8	14.9	10.2	11.4	9.7	13.9	16.8	20.7
60		30	H30-F30	12.8	12.5			12.5	11.9	11.3	11.1			15.5	13.5
90		60	H30-F60	10.8	10.9			11.1	10.9	10.5	10.3			10.2	11.7
60	60	0	H60-F0	17.6	14.1			17.7	14.4	26.9	27.5			34.2	33.9
90		30	H60-F30	12.3	12.4			12.8	12.7	22.2	16.3			20.4	16.7
120		60	H60-F60	11.3	11.3			11.6	11.5	16.1	14.7			15.3	13.2

(1): Estimated from frequency response function

(2): Estimated from time record data of free vibration

(a) Relation between frequency and furniture-load

(b) Relation between frequency and human-load

Fig. 6 Relation among first natural frequency, furniture-load and human-load

(a) Relation between damping factor and furniture-load

(b) Relation between damping factor and human-load

Fig. 7 Relation among damping factor, furniture-load and human-load

2本の梁それぞれについて得られた値の平均値である。また、周波数応答関数に基づいて1次固有振動数を決定するに当たっては、実験モード解析により、1次固有振動数に対応する振動モード形が梁の曲げ振動の1次モードであるsin関数波形の半周期の形状と類似していることを確認していることを付記しておく。

以上の実験結果に基づき、考察を進める。

4.1 1次固有振動数と積載荷重の関係

Fig. 6には、Table 4に示した結果に基づき、Type-AおよびType-Cの場合の1次固有振動数と物品荷重および人間荷重との関係が示してある。Fig. 6(a)は、人間荷重がそれぞれ0, 30, 60 kg/m²の場合において物品荷重が0～60 kg/m²に変化した状態を、Fig. 6(b)は、物品荷重がそれぞれ0, 30, 60 kg/m²の場合において人間荷重が0～60 kg/m²に変化した状態を、それぞれ示している。Fig. 6から次のことがいえる。

Type-AとType-Cにおける物品荷重が0で人間荷重が30 kg/m² [H30-F0]および60 kg/m² [H60-F0]の場合の1次固有振動数の値は、変位応答波形に基づく場合と周波数応答関数に基づく場合とで約20%異なるが、それ以外の場合には両同定法の違いによる差は5%以下で両同定法による差異は小さいことがわかる。評価値に大きな差異が生じたType-Aの応答変位波形を眺めると[Fig. 4参照], [H60-F0]の場合は概ね3周期で振動が収束し、振幅が概ね0に収束するまでの時間は約0.4秒間と短く、[H30-F0]の場合にあっても概ね5周期で振動が収束していることがわかる。この傾向は試験体Type-Cにおいても同様にみられたが、このことは高減衰振動性を有する木造床の振動特性値同定の困難性を示すものであろう。

木造床の1次固有振動数に及ぼす物品荷重・人間荷重の影響を見るために、Fig. 6

全体を眺めると、人間荷重が 0, 30, 60 kg/m² それぞれの場合においては物品荷重が 0 から 60 kg/m² に増加するに伴い、1 次固有振動数が低下する傾向がみられるのに対し [Fig. 6(a) 参照], 物品荷重が 0, 30, 60 kg/m² それぞれの場合においては人間荷重が 0 から 60 kg/m² に増加しても 1 次固有振動数はほとんど変化しない傾向がみられる [Fig. 6(b) 参照]. このことは、物品荷重は床組の 1 次固有振動数を低下させる因子となるが、本実験の固有振動数の範囲 10 ~ 18Hz では人間荷重の固有振動数への影響は小さく、床組の 1 次固有振動数を推定する上ではその重量を除外して考えてよいことを示唆している。すなわち、学会規準において床の固有振動数 10 Hz を目安として「絶対変形量 2 cm」を誘導する際に、『床上に人が多勢のっている場合の振動は減衰してかえって感じなくなる』ことを理由として『荷重 w の中から人間荷重を除外する』措置を採ったことは、実態として人間荷重は固有振動数に影響しないことから、妥当な措置であったといえよう。

4.2 1 次固有振動数に対する減衰定数と積載荷重の関係

Fig. 7 には、Table 4 に示した結果に基づき、Type-A および Type-C の場合の減衰定数と物品荷重および人間荷重との関係が示してある。Fig. 7(a) は、人間荷重がそれぞれ 0, 30, 60 kg/m² の場合において物品荷重が 0 ~ 60 kg/m² に変化した状態を、Fig. 7(b) は、物品荷重がそれぞれ 0, 30, 60 kg/m² の場合において人間荷重が 0 ~ 60 kg/m² に変化した状態を、それぞれ示している。Fig. 7 から次のことがいえる。

Type-A における「H60-F30」および Type-C における「H30-F0」と「H60-F30」の減衰定数の値は、変位応答波形に基づく場合と周波数応答関数に基づく場合とでは減衰定数値として 5 % 程度の差異があるが、この理由も、前述した高減衰振動性を有する木造床の振動特性値同定の困難性によるものであると考えられる。この 3 例を除けば、両同定法による評価値に大きな差異はみられないといつてよからう。

木造床の減衰定数に及ぼす物品荷重・人間荷重の影響の全体的な傾向を見るために、Fig. 7 を眺めると、次のことが指摘できよう。

(1). 物品荷重が 0 ~ 60 kg/m² で変化した場合 [Fig. 7(a) 参照]:
人間荷重がない場合、物品荷重が変化しても減衰定数に大きな変化はなく 2 ~ 4 % 程度である。人間荷重が 30 kg/m² の場合、Type-A については物品荷重が変化しても減衰定数に大きな変化はなく約 10 % 程度であるが、Type-C については物品荷重が増加するに伴い 18 % 程度から約 10 % に低下する傾向が見られる。人間荷重が 60 kg/m² の場合、試験体タイプに拘わらず、物品荷重が増加するに伴い 30 % 前後から 15 % に低下する傾向が見られる。

(2). 人間荷重が 0 ~ 60 kg/m² で変化した場合 [Fig. 7(b) 参照]:

物品荷重がない場合、人間荷重が 0 から 60 kg/m² に変化するると減衰定数は 4 % 程度から約 30 % に飛躍的に増大することがわかる。物品荷重が 30 kg/m² および 60 kg/m² の場合にも人間荷重が増大するに伴って減衰定数は大きくなる傾向があるが、物品荷重が大きいくほどその増加割合は小さい。Fig. 8 には Table 4 に示した結果に基づいた減衰定数と [人間荷重 / (固定荷重 + 物品荷重)] 値の関係が示してある。同図より、両者の間には概ね比例の関係があること、すなわち、床の減衰定数の値は、床の重量に対する人間荷重の割合に比例して増加する傾向があることがわかる。

Fig. 8 Relation between damping factor and weight ratio of human-load

4.3 連続体の曲げ振動理論による 1 次固有振動数の推定

床の 1 次固有振動数推定方法としての連続体の曲げ振動理論の適用性について検討する。

(1) 連続体の曲げ振動理論の適用方法

Type-A, Type-B, Type-C の各試験体について Fig. 9 に示すような支持条件の連続体としてモデル化し、静的試験より得られた床組の曲げ剛性 (EI) および実測した固定荷重と積載荷重を用いて、連続体の曲げ振動理論 (Appendix [1] 式参照) に基づき 1 次固有振動数の推定を行うこととする。Type-C の 1 次固有振動数は、両端ピン支持梁として捉えて連続体の曲げ振動理論を適用すれば Appendix 中の [2] 式で求めることができる。Type-A の場合は、支持点より跳ね出した部分の曲げ剛性と質量を考慮すれば、Appendix 中の [3] 式を満足する最小の f の値 ($f > 0$) が 1 次固有振動数となり、逐次近似法を用いて同式の解が求められる。Type-B の場合は外的不静定構造物であり、支点の状態を適切に評価することが必要となる。この場合、スパン 6.5m 位置での支持条件はピン支持とし、跳ね出し部分先端の拘束状態をバネ要素によりモデル化することとしたが、跳ね出し部端部支点のバネ定数はスパン中央部集中荷重 (静的) 試験の荷重 ~ スパン中央部変位関係を用いて決定した。具体的には、汎用の有限要素法解析ソフトを用い、静的試験によるスパン中央部変位と解析値とが等しくなるバネ剛性の値を試行錯誤的に求め、バネ定数を 11.0 kN/mm と算定した。その状態の固有振動数は、解析ソフトの固有値解析により求めることとした。

(2) 計算結果と実験結果の比較

Fig. 10(a) ~ (c) は、各試験体条件について、実験から得られた変位応答波形に基づく 1 次固有振動数と連続体の曲げ振動理論から得られた値とをプロットしたものである。図中の [○] 記号は重量として [固定荷重 + 物品荷重 + 人間荷重] の値を用いた場合、[□] 記号は重量として人間荷重を除いた [固定荷重 + 物品荷重] の値を用いた場合である。また、同図中の直線は、実験値と解析値が一致する

Fig. 9 Schematic diagram of floor models for analyses

Fig.10 Comparison of first natural frequency between experiments and analyses

る状態を示すものである。Fig. 10 から次のことがいえる。

人間荷重のない場合 [Fig. 10 (a) 参照], 全ての試験体において曲げ振動理論により推定した1次固有振動数の値は実験値とよく一致しており, 連続体の曲げ振動理論の適合性を証している。次に, 人間荷重が 30 kg/m² および 60 kg/m² の場合 [Fig. 11 (b), (c) 参照] についてみれば, 重量として人間荷重を除いた [固定荷重+物品荷重] の値を用いて算定される固有振動数 ([□] 記号) は, 実験値と概ね 10%以下の誤差範囲で一致していることがわかる。

以上のことから, 床組の1次固有振動数は連続体の曲げ振動理論に基づき算定することが可能であり, その場合, 床組の重量として固定荷重と積載荷重内の物品荷重だけを考慮すればよいことが確認されたといえよう。また, Type-Bのような外的不静定構造物についても支持状態を適切に評価できれば, 連続体の曲げ振動理論を適用可能であることも確認された。

5. まとめ

木造床の鉛直振動特性に及ぼす人間荷重等の影響について調べるために行った, スパン 6.5m の実大部分床を対象としたインパクトハンマー加振実験により明らかになったことを纏めると以下のようになる。

- (1) 床の1次固有振動数 10 ~ 18Hz の範囲では, 人間荷重の固有振動数への影響は小さく, 人間荷重が載加されても固有振動数はほとんど変化しない。
- (2) 1次固有振動数に対する減衰定数の値は, 床の重量 (固定荷重と物品荷重との和) に対する人間荷重の割合に比例して増加する傾向がある。
- (3) 木造床の1次固有振動数は, 曲げ剛性・支持条件・重量 (固定荷重と物品荷重の和) に基づき, 連続体の曲げ振動理論を適用して推定が可能であることが確認された。

謝辞 本研究を始めるにあたり, 法政大学教授・工学博士 後藤剛史先生には, 環境振動に関して多大なる御教示を戴きました。ここに記して感謝の意を表します。また, 本研究の実験実施に際し, 当時両研究室に在籍した, 職業能力開発総合大学校 山内智香君, 並びに, 明治大学 鎌田俊也君のご協力を得ましたことにお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本建築学会: 木質構造設計標準・同解説 - 許容応力度・許容耐力設計法 -, 2002年10月
- 2) 竹山謙三郎・久田俊彦: 木造床組の振動挙動に就いて: 建築学会論文集第33号, 昭和19年4月
- 3) 飯塚五郎蔵: 住宅デザインと木構造, 丸善, 昭和57年4月
- 4) 日本建築学会: 建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説, 1991.4
- 5) 中村昇・野地清美・西山豊・伊野部健吉・安藤直人: 木造床の振動性状と感覚評価, 日本木材学会木材学会誌, Vol. 49, No. 2, p. 78-83, 2003
- 6) 横山裕: 苦情発生の有無からみた実大住宅床振動の測定条件, 境界値の提示, 日本建築学会構造系論文集, 第546号, p. 17-24, 2001.8
- 7) 日本建築学会: 建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説, 2004.5
- 8) 藤野栄一・鈴木秀三・野口弘行: 木造床の振動特性に及ぼす人間荷重の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海) C-1 構造Ⅲ, p. 241-242, 2003.9
- 9) 鈴木秀三・野口弘行・藤野栄一・五十田博: 木造複合建築構造技術の開発, 木質ハイブリッド床の鉛直振動特性に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海) C-1 構造Ⅲ, p. 253-254, 2003.9
- 10) 日本建築学会: 建築物荷重規準案・同解説 (1975年制定), 昭和50年3月
- 11) 竹山謙三郎: 木構造, 丸善, 昭和26年3月
- 12) 日本建築学会: 建築物の振動実験, 昭和53年12月

— Appendix —

Free vibration equation of motion for bending beam

$$EI \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + w \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0 \quad [1]$$

EI : Bending stiffness

w : Mass density

v : displacement in vertical direction

Type-C

$$f = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{EI}{w}} \quad [2]$$

f : 1st natural frequency

EI : Bending stiffness

$(N \cdot m^2)$

w : weight (kg/m)

Type-A

f : 1st natural frequency
("f" is a least positive value)

EI_2, EI_1 :
Bending stiffness
($N \cdot m^2$)

w_2, w_1 :
weight (kg/m)

$$\frac{a \cdot c + b \cdot d - 1}{a \cdot d - b \cdot c} - \frac{a \cdot c - b \cdot d + 1}{a \cdot d + b \cdot c} - \frac{b'}{a'} + \frac{d'}{c'} = 0 \quad [3]$$

$$a = \cos(-\alpha \cdot l \cdot p), b = \sin(-\alpha \cdot l \cdot p),$$

$$c = \cosh(-\alpha \cdot l \cdot p), d = \sinh(-\alpha \cdot l \cdot p)$$

$$a' = \cos(l \cdot q), b' = \sin(l \cdot q),$$

$$c' = \cosh(l \cdot q), d' = \sinh(l \cdot q)$$

$$p = \sqrt{\frac{w_2 \cdot (2\pi \cdot f)^2}{EI_2}}, \quad q = \sqrt{\frac{w_1 \cdot (2\pi \cdot f)^2}{EI_1}}$$

(2004年1月15日原稿受理, 2004年8月12日採用決定)