

# 床振動評価のための加振力に関する基礎的研究

## 一人の動作による加振力の同定と標準加振源の選定

Fundamental Study of Exciting Force Used for the Estimation of the Severity of a Floor Vibration  
- Estimation of Human Induced Exciting Force and Decision of Standard Impulsive Force -

原田 浩之 HIROYUKI HARADA

小坂 英之 HIDEYUKI KOSAKA

床振動のシミュレーション解析を行う際に必要となる加振力の時刻歴波形を得るために、歩行・足踏み・連続ジャンプなど、人の動作による加振力を実測し、それら加振力をフーリエ級数で表現した。また、統一的な床振動の評価を行うために、ゴムボール、砂袋の落下およびバングマシンの打撃による加振力を測定し、体感領域における床振動評価のための標準加振源としてゴムボールが有用であることを確認した。

キーワード：床スラブ、鉛直振動、加振力、人の動作、標準加振源

For the estimation of the exciting force which is used for the simulation analysis of a floor response, the exciting force induced on a floor by the human movements, for example walking, standstill, consecutive jumps, were measured, and expressed as the Fourier series. Furthermore, for the standard estimation of the severity of a floor vibration, impulsive force which is caused on a floor by fall of a rubber ball or a gizzard or by a blow with a Bang-machine was measured, and the force from the fall of a rubber ball was selected as a standard impulsive force.

**Key Words:** Floor Slab, Vertical Vibration, Exciting Force, Human Movements, Standard Impulsive Force

### 1. はじめに

建築物の各用途に応じた床スラブの要求性能を満足させるためには、人の動作や生産機器等の稼働による床振動を適切に評価しなければならない。近年では、設計時に数値計算により床の挙動をシミュレートして床振動を評価し、建物完成後に必要に応じて床振動を実測して検証することがある。ここで、数値計算を行うためには床を揺らす加振力の時刻歴波形が必要であるが、たとえば人の動作のようにある程度再現性のある加振源に限定しても、文献 1)~4)などでさまざまな時刻歴波形が示されているものの、それら相互の乖離は大きいのが現状である。また、床振動を実測することによって数値計算との整合性を検証するためにはばらつきの少ない安定した加振源が必要であるが、文献 5),6)で提案されている装置は特殊なものであるため汎用的であるとは言い難く、文献 7)などで検討されているゴムボールは汎用性が高

いものの、体感振動領域の標準加振源としてのデータの蓄積をさらに進め、有用性を確認する必要があるものと考えられる。

本論では、以上の状況を鑑みて、比較的再現性のある歩行や小走りなどの人の動作による加振力を実測し、数値計算に適用できる加振力モデルを構築している。また、統一的な床振動の評価を行うために、ゴムボール、砂袋の落下およびバングマシンの打撃による加振力を測定し、それら加振源の標準加振源としての適用性について検討している。

### 2. 実験概要

#### (1) 床反力測定機

図-1、写真-1 に床反力測定機を示す。床反力測定機は鉛直方向の加振力を直接測定するために製作したものであり、60cm 平方の鋼板を最大容量 2kN のロードセル

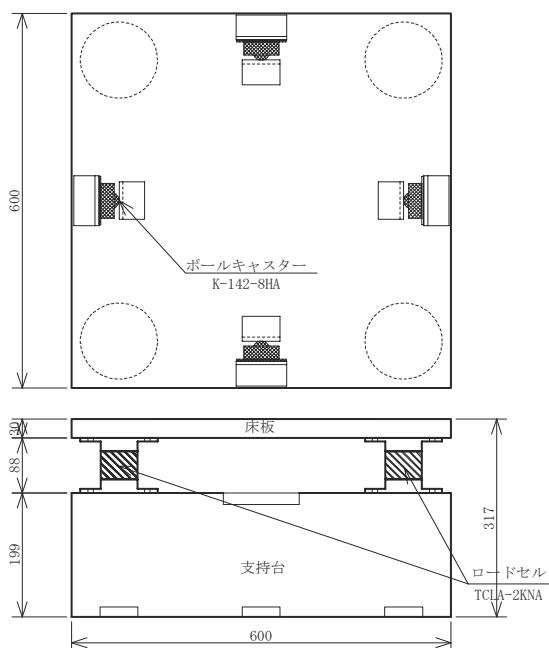


図-1 床反力測定機の概要

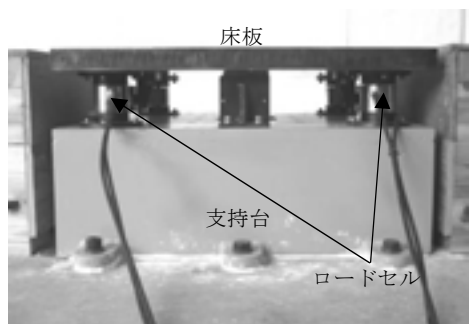


写真-1 床反力測定機

4 台で支持する構造となっている。ロードセルに水平荷重を負担させないために図-1 に示すようにボールキャスターを配置し、床板の水平変位を拘束している。床反力測定機の鉛直方向の 1 次固有振動数は 180Hz である。

(2) 実験内容

表-1 に実験項目の一覧を示す。実験はその目的によって大きく 3 つのケースに分けられ、CASE-1 では日常的な人の動作による加振力の時刻歴モデルを構築するために必要なデータを得ている。具体的には、歩行（基本周期 0.5 秒）と小走り（基本周期 0.35 秒）を測定対象としており、表-2 に示す 4 名が、それぞれ 4 回ずつ同じ動作を行い加振力を測定している。ここで、本実験では加振者が床反力測定機上に複数歩着地するのは不可能であるため、加振者はメトロノームにあわせて補助通路を進んだ後、床反力測定機上に一步着地してから、前方の補助通路へと通り過ぎることとし、歩行または小走りによる一步の加振力を測定することにした。写真-2 に実験の様子を示す。

表-1 実験項目の一覧

ケース	加振源	加振条件	実験回数
CASE-1	歩行	基本周期=0.5秒	4名×4回
	小走り	基本周期=0.35秒	4名×4回
CASE-2	足踏み	基本振動数 =2.0,2.5,3.0Hz	各3名×4回
	ジャンプ		
	膝屈伸		
CASE-3	ゴムボール	質量2.5kg, 落下高さ100cm	12回
	砂袋	質量7.8kg, 落下高さ26cm	12回
	バングマシン	タイヤ, 落下高さ85cm	12回
	かかと衝撃	(規定せず)	3名×4回
	跳びはね		3名×4回

表-2 加振者の一覧

加振者の呼称	A	B	C	D
体重[N]	608	814	863	657
年齢・性別	41歳・男	45歳・男	39歳・男	33歳・男

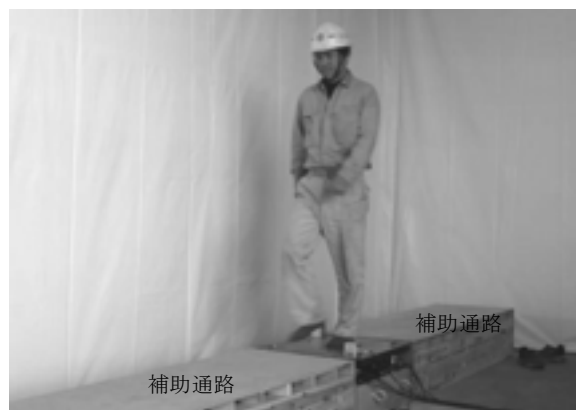


写真-2 歩行による加振力測定実験の様子

CASE-2 はエアロビクスなどの運動による加振力のモデル化に必要な基礎データを得るためのものであり、動作としては、エアロビクス運動に含まれる基本的な動きの中から、比較的大きな加振力を生じさせられると思われる足踏み、連続ジャンプ、膝屈伸の 3 つを選定した。各動作の基本振動数は 2.0Hz, 2.5Hz, 3.0Hz とし、表-2 に示す加振者 A~C の 3 名がメトロノームに合わせて、それぞれ 4 回ずつ同じ動作を繰り返した。

CASE-3 は各種衝撃源の標準加振源としての適用性を検討するための実験であり、標準加振源の候補として、砂袋、JIS A 1418-2:2000<sup>8)</sup>に規定されるゴムボールとバングマシン（タイヤ）の 3 つをとりあげた。ここで、砂袋の質量は 7.8kg, 落下高さは 26cm とし、ゴムボールの落下高さは 100cm とした。また、比較のために、表-2 に示す加振者 A~C の 3 名について、かかと衝撃や跳びはねによる加振力（衝撃力）を測定した。

なお、加振者は以上すべての動作を靴下のみを履いた状態で行うことにした。

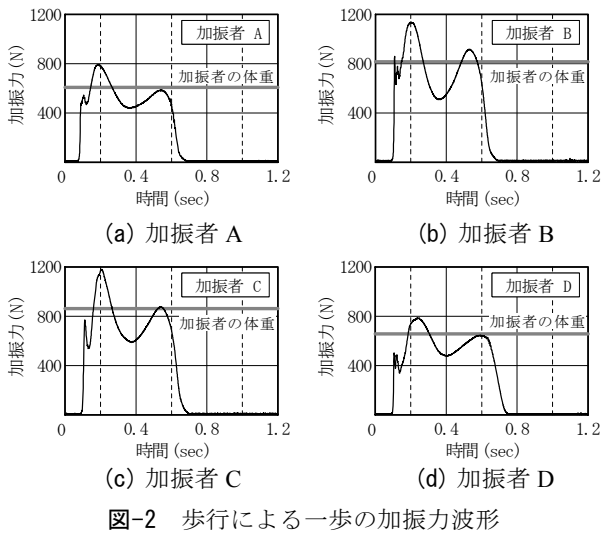


図-2 歩行による一步の加振力波形

(3) 測定概要

測定項目は床反力測定機を構成するロードセルの荷重 (4 点) とし、測定データは動ひずみアンプ (6M62, NEC 三栄社) を介して、データロガー (NR-110, KEYENCE 社) に収録した。収録のサンプリング振動数は CASE-1 では 2kHz, CASE-2 では 1kHz, CASE-3 では 5kHz とし、収録時間はそれぞれ 2.1 秒, 8.2 秒, 0.41 秒とした。

3. 実験結果と考察

CASE-1 および CASE-2 で扱う人の動作による加振力は、式(1)に示すフーリエ級数で表現するのが一般的であるため、本論でもその方法にならない、 $n$ 次高調波における荷重振幅の加振者の体重に対する比 (以下、動的荷重係数)  $\alpha_n$  と  $n$ 次高調波の基本波に対する位相差 (以下、位相差)  $\phi_n$  を実験結果から求めることによって加振力モデルを構築することにする。また、CASE-3 で扱う衝撃力に関しては、最大値と最大値に至るまでの力積を指標として比較・検討を行うことにする。なお、本論では床スラブに作用する加振力のうち、静荷重 (たとえば加振者の体重など) を除く動荷重のみを加振力と呼ぶことにし、加振力の正方向は重力加速度の作用する方向とする。

$$F_d(t) = W \times \sum_{n=1}^k \alpha_n \sin(2\pi nft + \phi_n) \quad (1)$$

- $F_d(t)$ : 時刻  $t$  における加振力 (= 動荷重)
- $W$ : 加振者の体重,  $n$ : 高調波の次数
- $k$ : 対象とする高調波の次数の上限
- $\alpha_n$ :  $n$ 次高調波における荷重振幅の  $W$  に対する比
- $f$ : 繰り返しの基本振動数 (= 加振振動数)
- $\phi_n$ :  $n$ 次高調波の基本波に対する位相差

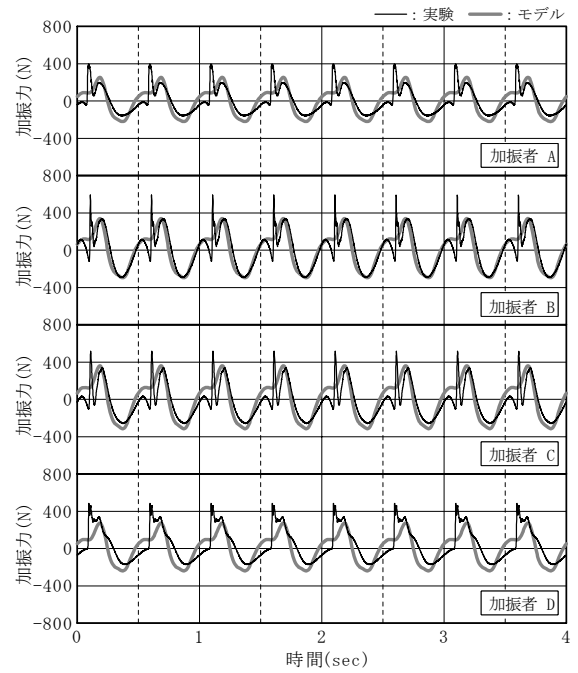


図-3 歩行による加振力波形

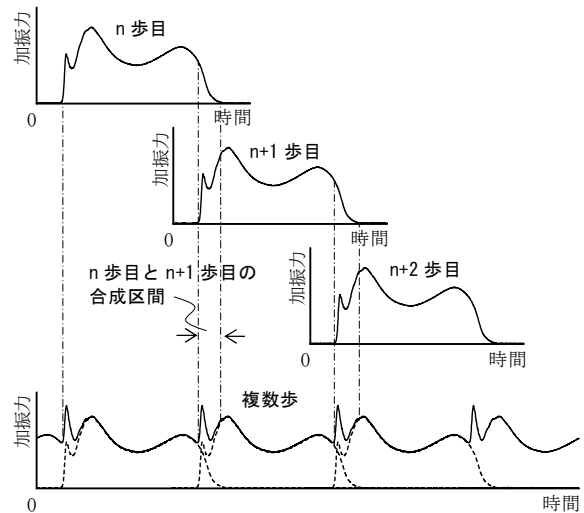


図-4 加振力波形の合成方法

(1) 歩行・小走りの加振力モデル

a) 歩行による加振力

図-2 に実験より得られた一步の加振力波形を示す。波形は二峰形をしており、加振力の最大値は加振者の体重の 1.3~1.4 倍、作用時間は歩調よりもやや長く 0.6 秒前後であることがわかる。

図-3 に一步の加振力より求めた複数歩の加振力波形を示す。複数歩の加振力波形は、加振力が常に同じ位置に作用するとみなして、図-4 に示すように、両足が着地する約 0.1 秒の区間 ( $n$  歩目と  $n+1$  歩目の重なる部分) を重ね合わせた後、加振者の体重による静荷重を差し引くことにより作成した。そのため、複数歩の加振力波形は一步の加振力波形に比べ、少し複雑な形状になっている。

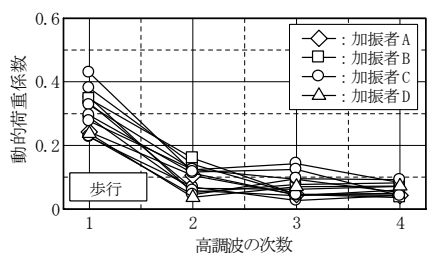


図-5 歩行加振力の動的荷重係数

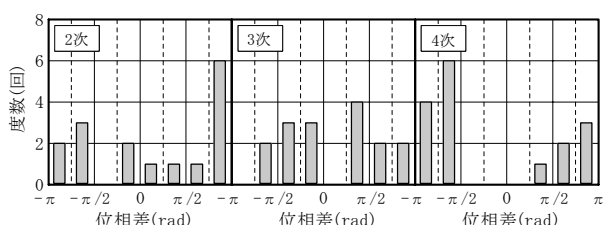


図-6 歩行加振力の位相差の度数分布

表-3 加振力モデルの動的荷重係数と位相差 (歩行)

項目	基本波	2次高調波	3次高調波	4次高調波
動的荷重係数	0.32	0.12	0.06	0.05
位相差(rad)	0	$+5/6\pi$	$+1/4\pi$	$-2/3\pi$

図-5 に複数歩の加振力波形より求めた 4 次高調波までの動的荷重係数を、図-6 に 2~4 次高調波の位相差の度数分布を示す。動的荷重係数は、測定データに基本振動数およびその 2,3,4 倍の振動数を中心とする 1/3 オクターブバンド幅のバンドパスフィルタを適用した後の加振力波形 (以下、有効加振力波形) の最大振幅を加振者の体重で除することにより求めた。また、位相差は有効加振力波形を中心振動数の正弦振動とみなすことにより、最大振幅を記録した時刻から逆算した。

本実験結果では、動的荷重係数・位相差ともに相当のばらつきが見られるが、加振力モデルの構築にあたっては、動的荷重係数は全実験データの平均値、位相差は最頻区間に属するデータの平均値として与えることにし、表-3 に示すように決定した。図-3 に示した灰色の波形が得られた加振力モデルである。加振力モデルは、実測データに見られる瞬間的な加振力の変化を再現するまでには至っていないが、その基本的な特徴は十分に捉えられていると考えられる。したがって、本項で定めた加振力モデルは、床振動のシミュレーション解析に使用する上で、十分な精度を有するものであると考えられる。なお、今回定めた加振力モデルによる歩行加振力の大きさは、文献 9) にまとめられている既往の研究結果 (実測値) と比較的良い整合を示している。

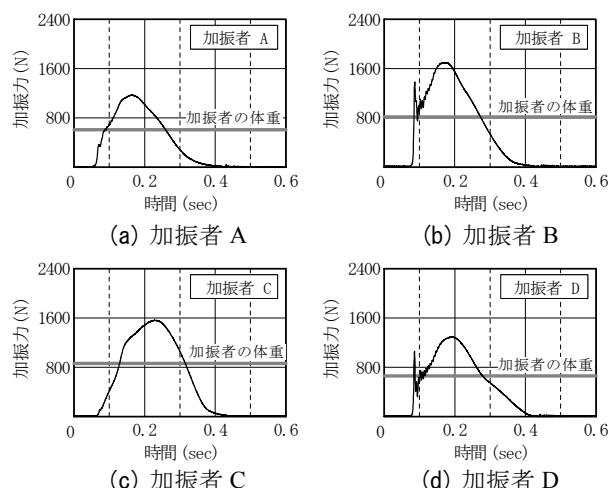


図-7 小走りによる 1 歩の加振力波形

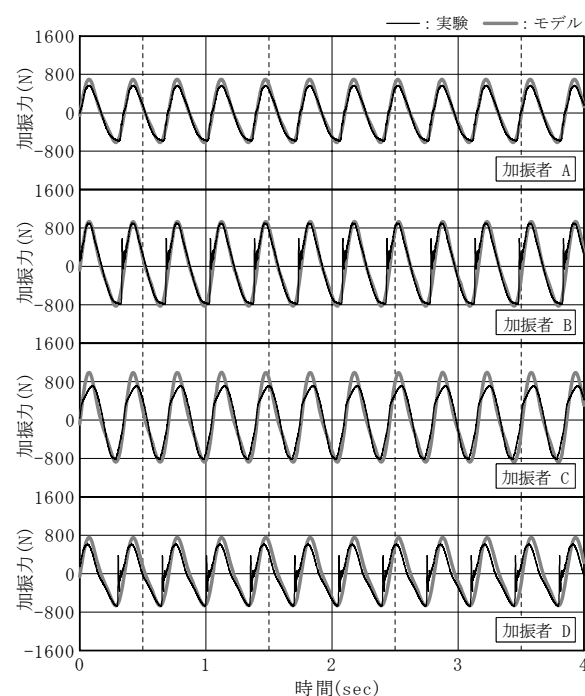


図-8 小走りの加振力波形

### b) 小走りの加振力

図-7 に実験より得られた小走り (一歩) の加振力波形を示す。加振力の最大値は加振者の体重の 2 倍程度、作用時間は小走りのステップ (周期) にほぼ等しく 0.35 秒前後であることがわかる。また、波形の形状は基本的には一峰形であるが、加振者 B・加振者 D の場合には、最初の着地の瞬間にかなり大きな衝撃力が発生していることがわかる。これは、加振者 A・加振者 C がつま先から着地していたのに対し、加振者 B・加振者 D がかかとから着地していたことによるものであると考えられる。

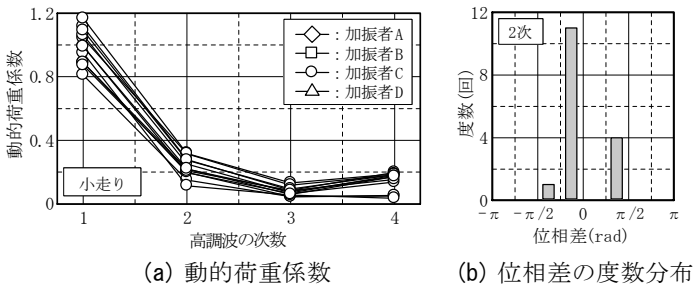


図-9 動的荷重係数と位相差の度数分布（小走り）

表-4 加振力モデルの動的荷重係数と位相差（小走り）

項目	基本波	2次高調波
動的荷重係数	1.00	0.23
位相差(rad)	0	$-1/8\pi$

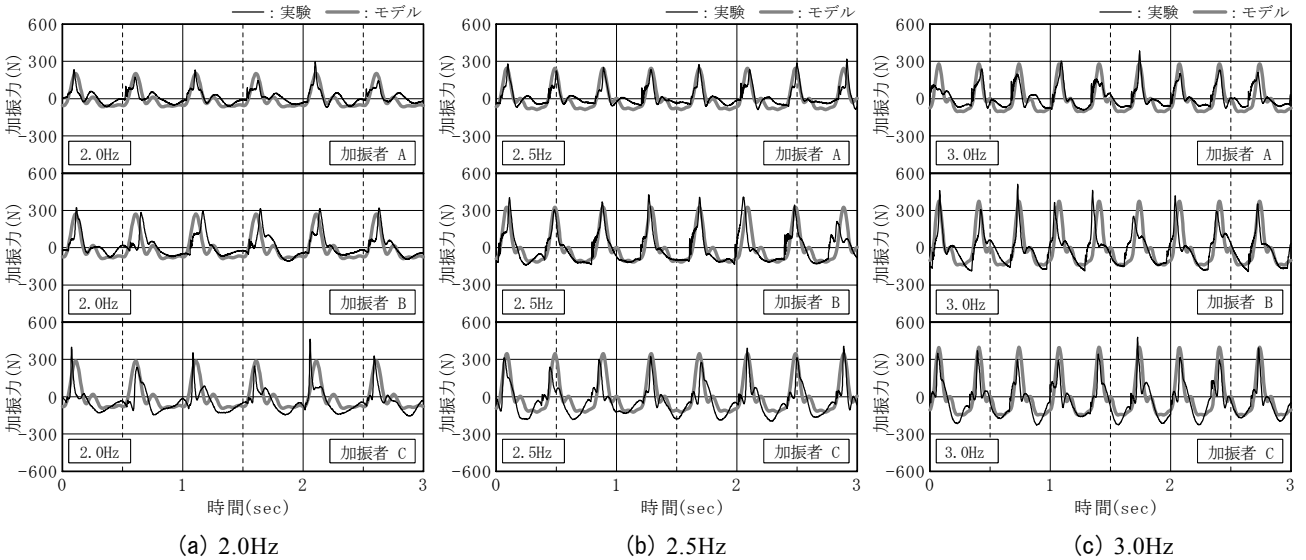


図-10 足踏みの加振力波形

図-8 に一步の加振力より求めた複数歩の加振力波形を示す。ここで、一步から複数歩の加振力波形を求める手順は前項で示した歩行の場合と同じである。小走りによる加振力波形は“のこぎりの刃”のような形状をしており、基本的には1次と2次の高調波の重ね合わせで表現できると考えられる。

図-9 に前項と同じ方法で求めた小走りによる加振力波形の(a)動的荷重係数と(b)2次高調波の位相差の度数分布を示す。動的荷重係数は、歩行の場合と同様にかなりばらついているが、ここでは全実験データの平均値である1.0(1次)と0.23(2次)を加振力モデルに使用することにする。一方、位相差については全データの70%が $-\pi/4\text{rad} \sim 0\text{rad}$ の範囲に集中しているため、この範囲にある測定データの平均値 $-\pi/8\text{rad}$ を使用する。表-4 に小走りの加振力モデルに用いた動的荷重係数と位相差を示す。

図-8 に示した灰色の波形が得られた加振力モデルである。加振力モデルは実測データの加振力波形を精度良く模擬していることが確認できる。

(2) 足踏み・連続ジャンプ・膝屈伸の加振力モデル

a) 足踏みによる加振力

図-10 に足踏みの加振力波形を、図-11 に4次高調波までの動的荷重係数を、図-12 に2~4次高調波の位相差を示す。ここで、時刻歴波形から各次の動的荷重係数・位相差を求める手順は前節で示したとおりである。なお、動的荷重係数については基本振動数(加振振動数)ごとに結果を示しているが、位相差についてはデータのばらつきが特に大きかったため、全データをまとめて、ひとつのヒストグラムにしている。

歩行・小走りの場合と同様に、動的荷重係数には相当のばらつきがみられるが、ここでは基本振動数(加振振動数)ごとに全データを平均することによって各次の動的荷重係数を決定した。ただし、4次高調波に関しては、その影響度が非常に小さいと考えられるため、平均値ではなく最小値を使用した。また位相差は、2次高調波では $-3/4\pi\text{rad} \sim 0\text{rad}$ 、3次高調波では $-\pi\text{rad} \sim -\pi/2\text{rad}$ 、4次高調波では $-\pi/4\text{rad} \sim +3/4\pi\text{rad}$ の範囲に属するデータの平均とした。表-5 に加振力モデルに用いた動的荷重係数と位相差を示す。



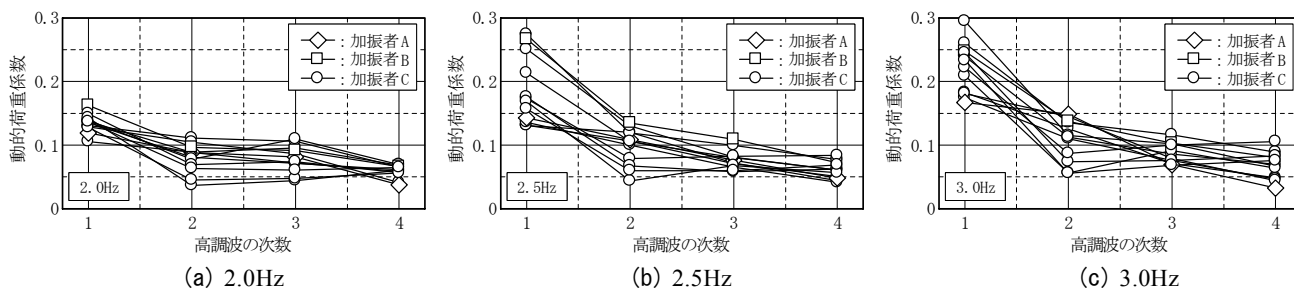


図-11 足踏みによる加振力波形の動的荷重係数

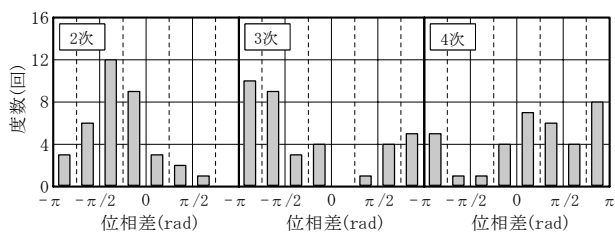


図-12 位相差の頻度分布 (足踏み)

表-5 加振力モデルの動的荷重係数と位相差 (足踏み)

項目	基本波	2次高調波	3次高調波	4次高調波
動的荷重係数	(2.0Hz)	0.14	0.08	0.04
	(2.5Hz)	0.19	0.1	0.04
	(3.0Hz)	0.23	0.11	0.04
位相差(rad)	0	$-1/3\pi$	$-3/4\pi$	$+2/3\pi$

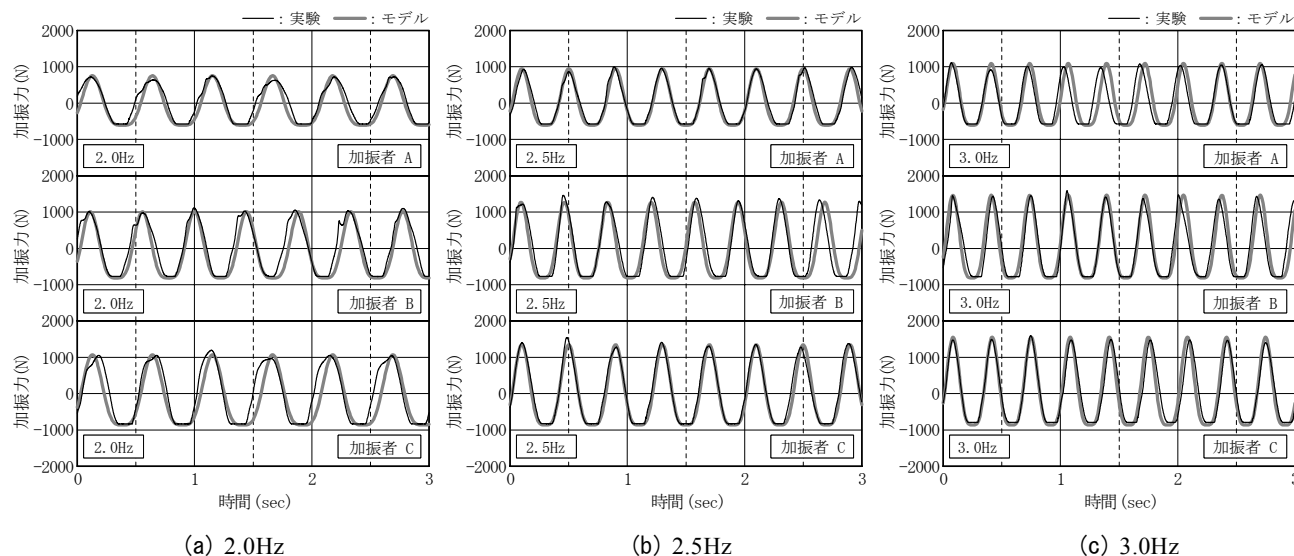


図-13 連続ジャンプによる加振力波形

図-10 に示した灰色の波形が得られた加振力モデルである。加振力モデルは、基本振動数が 2.0Hz, 2.5Hz, 3.0Hz のいずれの場合においても、比較的良好な精度で実測データを模擬しているといえる。したがって、本項で定めた加振力モデルを使用することによって、足踏みによる床振動をより正確に推定することが可能になると考えられる。

b) 連続ジャンプによる加振力

図-13 に連続ジャンプによる加振力の時刻歴波形を示す。ジャンプでは、加振者が床から浮き上がる(離れる)瞬間があるため、加振力の時刻歴波形には、加振者の体重に相当する荷重で一定となる区間が見られるが、基本的には正弦半波パルスの連続であると考えられる。

したがって、その加振力波形は、基本波と 2 次高調波を  $-\pi/2$  だけ位相をずらして重ね合わせるにより模擬できると考えられる。

式(1)に  $k=2, \phi_1=0, \phi_2=-\pi/2$  を代入し、時刻  $t$  における加振力  $F_d(t)$  を求めると次式となる。

$$F_d(t) = W \times \{ \alpha_1 \sin(2\pi ft) - \alpha_2 \cos(4\pi ft) \} \quad (2)$$

したがって、加振力波形の極値は  $\sin(2\pi ft) = \pm 1$  と  $\sin(2\pi ft) = -\alpha_1/4\alpha_2$  を満足する時刻  $t$  で現れ、その値は  $W(\alpha_1 + \alpha_2), W(-\alpha_1 + \alpha_2), -W \{ (\alpha_1^2 + 8\alpha_2^2) / (8\alpha_2) \}$  となる。また、 $\alpha_1 \geq \alpha_2 > 0$  であるから、 $W(\alpha_1 + \alpha_2)$  が最大値、 $W(-\alpha_1 + \alpha_2)$  または  $-W \{ (\alpha_1^2 + 8\alpha_2^2) / (8\alpha_2) \}$  が最小値となる。よって、実験結果に見られるマイナス側で加振力が一定となる現象を再現するためには、

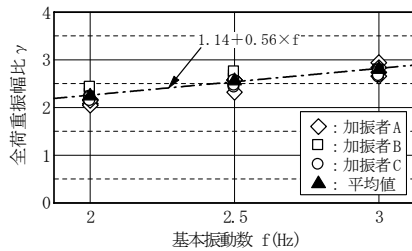


図-14 全荷重振幅比と基本振動数との関係 (ジャンプ)

表-6 連続ジャンプによる加振力算定のための諸係数

基本振動数 $f$	全荷重振幅比 $\gamma$	1次動的荷重係数 $\alpha_1$	2次動的荷重係数 $\alpha_2$	補正係数 $\beta$
2.0	2.24	1.12	0.28	-0.16
2.5	2.56	1.28	0.32	-0.04
3.0	2.80	1.40	0.35	0.05

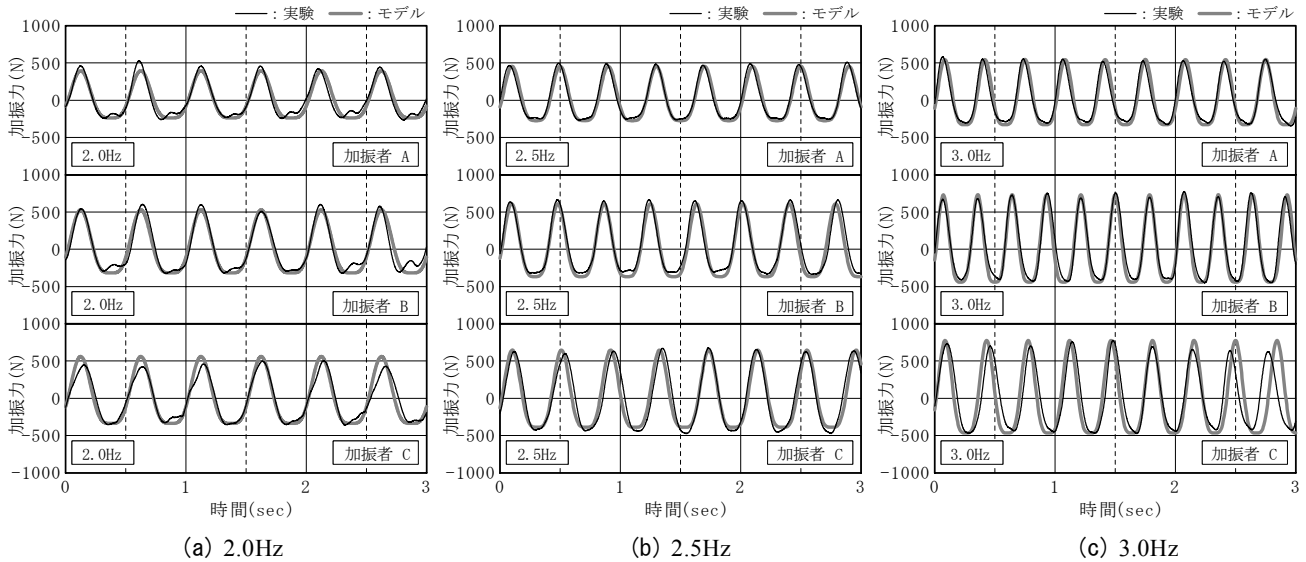


図-15 膝屈伸による加振力波形

$W(-\alpha_1 + \alpha_2)$ と  $-W \left\{ \frac{(\alpha_1^2 + 8\alpha_2^2)}{(8\alpha_2)} \right\}$ とを等しくする必要があり  $\alpha_1 = 4\alpha_2$ となる。ここで、最小値が  $-W$ となる条件を加えると、基本振動数にかかわらず  $\alpha_1 = 4/3$ ,  $\alpha_2 = 1/3$ となり、最大加振力は常に  $5W/3$ になって、実験結果と整合しなくなる。そこで、本論では補正係数  $\beta$ を用いて式(2)を式(3)のように修正することにする。

$$F_d(t) = W \times \{ \alpha_1 \sin(2\pi ft) - \alpha_2 \cos(4\pi ft) + \beta \} \quad (3)$$

$\beta$ を用いた場合、加振力の最大値は  $W(\alpha_1 + \alpha_2 + \beta)$ , 最小値は  $-W(\alpha_1 - \alpha_2 - \beta)$ となり、加振力波形の全荷重振幅の静荷重に対する比 (以下、全荷重振幅比)  $\gamma$ が求めれば、 $\alpha_1, \alpha_2, \beta$ は次式で決定できる。

$$\alpha_1 = \gamma/2, \quad \alpha_2 = \gamma/8, \quad \beta = 3\gamma/8 - 1 \quad (4)$$

図-14に全荷重振幅比  $\gamma$ と基本振動数  $f$ との関係を示す。全荷重振幅比  $\gamma$ は基本振動数  $f$ が高くなるにつれて大きくなっており、両者の関係は図中に一点鎖線で示した次式で近似できる。

$$\gamma = 1.14 + 0.56f \quad (5)$$

表-6に式(5)をもとに決定した全荷重振幅比  $\gamma$ , 動的荷重係数  $\alpha_1, \alpha_2$ および補正係数  $\beta$ を示す。

図-13中に灰色で示した波形が表-6の係数による加振力モデルである (ただし基本振動数は測定データにあわせて若干調整してある)。加振力モデルは実験結果と非常によく一致しており、連続ジャンプによる加振力波形は、表-6に示す係数を式(3)に適用することによって、十分な精度でモデル化できると考えられる。

文献 10)には既往の研究結果として、ジャンプ (2.5Hz)の加振力波形が示されている。波形の形状は今回の測定結果と同じであり、ここで示した加振力モデルの構築方法が十分に適用可能であると考えられる。ただし、加振力の最大値は、具体的な数値は示されていないが、今回の測定結果よりも若干大きくなっているため、最大値の設定に関してはもう少し検討する必要があると思われる。

### c) 膝屈伸による加振力

図-15に膝屈伸による加振力波形を示す。膝屈伸の加振力波形も、基本的には前項で示した連続ジャンプの場合と同様に、加振力が一定となる区間を有する正弦半波パルスの連続であると考えられる。したがって、前項で示した連続ジャンプの場合と同様に、基本波と2次高調波を  $-\pi/2\text{rad}$ だけ位相をずらして重ね合わせることで加振力モデルを構築することにする。ただし、膝屈伸

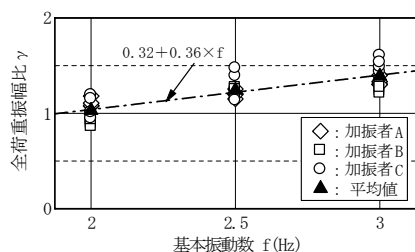


図-16 全荷重振幅比と基本振動数との関係 (足踏み)

表-7 膝屈伸による加振力算定のための諸係数

基本振動数 f	全荷重振幅比 γ	1次動的荷重係数 α <sub>1</sub>	2次動的荷重係数 α <sub>2</sub>
2.0	1.04	0.52	0.13
2.5	1.20	0.60	0.15
3.0	1.44	0.72	0.18

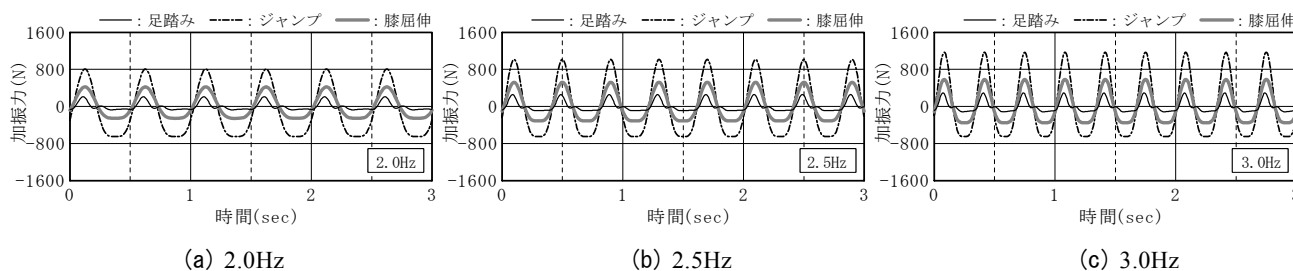


図-17 足踏み・連続ジャンプ・膝屈伸の加振力モデル

表-8 加振力モデルの最大・最小値と全振幅

加振方法	振動数(Hz)	①最大(N)	②最小(N)	①-②
足踏み	2.0	217	-71	288
	2.5	262	-93	355
	3.0	300	-111	411
ジャンプ (連続)	2.0	806	-650	1,456
	2.5	1,014	-650	1,664
	3.0	1,170	-650	1,820
膝屈伸	2.0	423	-254	677
	2.5	488	-293	781
	3.0	585	-351	936

d) 加振力モデルの比較

図-17 に加振者の体重を 650N とした場合の足踏み・連続ジャンプ・膝屈伸の加振力モデルを、表-8 に加振力モデルより求めた加振力の最大値・最小値・全振幅を示す。3つの動作による加振力の中では連続ジャンプによるものが最も大きく、膝屈伸の2倍、足踏みの4倍になっていることがわかる。また、加振力の最大値は、人の動作が足踏み・連続ジャンプ・膝屈伸のいずれであるにかかわらず、基本振動数が 2.0Hz から 2.5Hz, 3.0Hz と高くなるにつれて、それぞれ 1.2 倍, 1.4 倍に大きくなっていることがわかる。

の場合には、加振力の最小値は加振者の体重と同じ大きさ (符号は逆) にはならないため、前項で導入した補正係数 β は使用しない。つまり、本項では加振力  $F_d(t)$  を式(2)によって定義し、式(4)によって動的荷重係数 α<sub>1</sub>, α<sub>2</sub> のみを定めることにする。

図-16 に加振力波形の全荷重振幅比 γ と基本振動数 f との関係を示す。全荷重振幅比 γ は基本振動数 f が高くなるにつれて大きくなっており、両者の関係は図中に一点鎖線で示した次式で近似できる。

$$\gamma = 0.32 + 0.36f \quad (6)$$

表-7 に式(6)をもとに決定した全荷重振幅比 γ, 動的荷重係数 α<sub>1</sub>, α<sub>2</sub> を示す。図-15 中に灰色で示した曲線が表-7 の係数による加振力モデルである。加振力モデルと実験結果はよく一致しており、膝屈伸による加振力波形は、表-7 に示す係数を式(2)に適用することによって、十分な精度で模擬できることがわかる。

(3) 標準加振源の選定

衝撃力に関する検討では、床反力測定機の固有振動 (180Hz) が測定結果 (加振力) に及ぼす影響が問題となるため、本節では、実測データに 100Hz から 150Hz まで直線的に減少するローパスフィルタ (図-18 参照) を適用してから検討を行っている。ローパスフィルタの適用により、100Hz 以上の高振動数成分は実測データから削除されることになるが、体感領域の振動を対象としている本検討では、結果に及ぼす影響は無視できる程度に十分小さいと考えられる。

図-19 に各衝撃源による加振力の最大値を、図-20 に加振力が最大に達するまでの力積を示す。また、それらの図中に示した最大加振力・力積の平均値および変動係数の一覧を表-9 に示す。ここで、かかと衝撃と跳びはねに関しては、平均的な成人男性の体重を参考に、静荷重を 650N とした場合の加振力を示している。



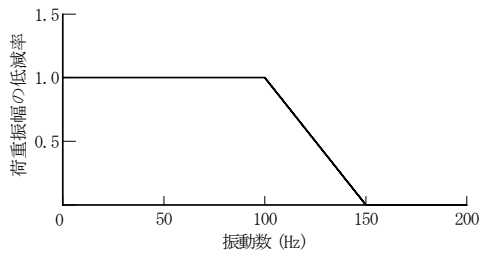


図-18 ローパスフィルタ

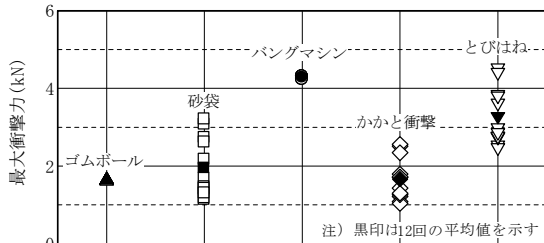


図-19 衝撃源による加振力の最大値

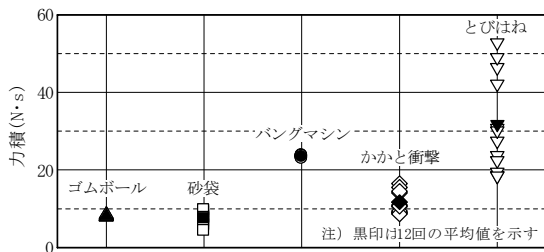


図-20 衝撃源による加振力が最大に達するまでの力積

ゴムボール・砂袋・バングマシンによる加振力を比較すると、最大値・力積ともに砂袋によるばらつきの程度（変動係数）が、他の2つに比べ大きくなっていることがわかる。これは、砂袋の場合には、砂は袋の中で比較的自由に動ける状態にあるため、加振源の形状が変化しやすく、床面との衝突状態が安定しないこと、および、落下高さが26cmと低いために、落下高さのばらつきによる影響度が他の2つの加振源に比べ大きいことによるものと考えられる。したがって、砂袋による加振力を安定させるためには、袋の大きさを調整して砂の移動する空間のない構造にするなどの改善が必要であり、床振動を統一的に評価する、あるいは、実測によって数値計算の精度を検証するといった目的で使用する加振源としては、現時点では、ゴムボールやバングマシンの方が適当であるといえる。なお、今回の測定によるゴムボール・バングマシンの最大加振力はそれぞれ1,630N、4,280N程度であり、JISに示されている値とほぼ同じであった。

一方、かかと衝撃や跳びはねによる加振力は、加振源が人であるため、最大値・力積ともにその変動係数は0.2~0.4程度にまで大きくなっており、そのばらつきの

表-9 衝撃源による加振力の最大値と力積（実測値）

加振源	加振力		力積	
	最大値(N)	変動係数	(N·s)	変動係数
ゴムボール	1,630	0.01	8.1	0.03
砂袋	1,942	0.40	7.4	0.22
バングマシン	4,276	0.01	23.4	0.01
かかと衝撃	1,617	0.34	13.0	0.23
とびはね	3,280	0.22	31.8	0.40

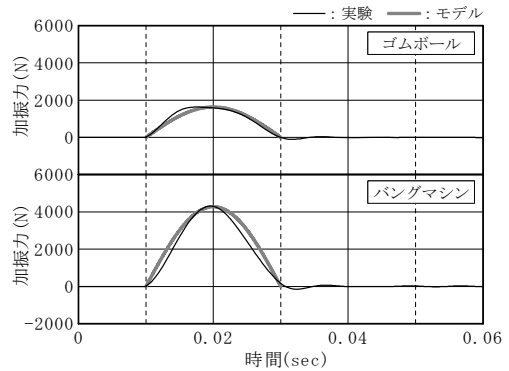


図-21 ゴムボール・バングマシンによる加振力波形

表-10 歩行・小走りによる加振力（モデル数値）

加振方法	振動数(Hz)	①最大(N)	②最小(N)	①-②
歩行	2.0	282	-248	530
小走り	2.9	747	-658	1,405

程度は砂袋落下と同等かそれ以上になっている。したがって、人の動作や砂袋落下などを加振源とする場合には、加振力にばらつきがあることを考慮して、多くのデータの平均化処理を行う必要があると考えられる。

図-21にゴムボールとバングマシンによる加振力の時刻歴波形を示す。黒色の波形は実験結果、灰色は表-9に示す最大加振力を振幅とする25Hzの正弦半波パルスである。実験結果と正弦半波パルスはよく一致しており、ゴムボール・バングマシンによる加振力は、正弦半波パルスで表現できることがわかる。したがって、標準加振源としてゴムボールまたはバングマシンを用いれば、数値計算における加振力波形（正弦半波パルス）と実際の加振力波形との差は無視できる程度であり、実測による数値計算の検証は、精度よく行えると考えられる。

表-10に歩行および小走りの加振力モデルより求めた加振力の最大値を示す。表-10および前出の表-8より、人ひとりの動作による加振力（全振幅）は300N~1,800Nであることがわかる。したがって、人の動作による床振動の評価を対象とする場合には、加振力の大きさが人の動作とほぼ同じレベルであるゴムボールや砂袋を加振源とするのが適当であるとも考えられる。

以上より、今回の検討の範囲では、人の動作による床振動評価のための標準加振源としては、JISに規定されるゴムボールが最も有用であると考えられる。なお、標準加振源には、その加振力特性とは関係ないが、手軽に持ち運びできるコンパクトさも必要であり、質量2.5kgのゴムボールはその要件も満足しているといえる。

#### 4. まとめ

内部加振源による床スラブの振動をより正確に予測・評価するために、人の動作や各種衝撃源の加振力を実測し、加振力モデルの構築および標準加振源の選定を行った。得られた結論をまとめると以下のとおりである。

##### <CASE-1>

- ①歩行（基本周期 0.5 秒）による加振力波形は表-3に示す動的荷重係数と位相差を用いて、4次までの高調波の和で表現できる。
- ②小走り（基本周期 0.35 秒）による加振力波形は2次までの高調波の和で表現できる。ここで、動的荷重係数は1次で1.0、2次で0.23であり、1次に対する2次の位相差は $-\pi/8$ radである。
- ③①,②に示した加振力モデルから求まる歩行・小走りによる加振力波形の両荷重振幅は、加振者の体重をWとしてそれぞれ0.8Wと2.2Wである。

##### <CASE-2>

- ④エアロビクス運動に含まれる足踏み・連続ジャンプ・膝屈伸の3つの動作の中では連続ジャンプによる加振力が最も大きく、足踏みによる加振力の4倍、膝屈伸による加振力の2倍である。
- ⑤足踏み・連続ジャンプ・膝屈伸による加振力は、加振源の種類によらず、基本振動数が2.0Hzから2.5Hz、3.0Hzと高くなるにつれて、それぞれ1.2倍、1.4倍に大きくなる。
- ⑥表-5～表-7に示す動的荷重係数と位相差を用いることにより、足踏みによる加振力波形は4次までの高調波、連続ジャンプと膝屈伸による加振力波形は2次までの高調波の和で表現できる。

##### <CASE-3>

- ⑦砂袋・ゴムボール・バングマシンによる加振力はそれぞれ1,940N、1,630N、4,280Nであり、成人男子（体重650N）によるかかと衝撃（最大加振力1,660N）の1.0～2.5倍、跳びはね（最大加振力3,280N）の0.5～1.3倍の大きさである。
- ⑧砂袋・ゴムボール・バングマシンによる加振力のはらつきの程度を比較すると、砂袋による加振力のはらつきが最も大きい。

⑨体感領域における床振動評価のための標準加振源としては、加振力の大きさやばらつきの程度およびその手軽さから考えて、今回の検討の範囲ではゴムボールが最も有用であると考えられる。

今後は、加振者の数や反復回数を増やすことによつて、今回提案した人の動作による加振力モデルの精度を高めていくとともに、標準加振源についてもさらに詳細な検討を行っていく所存である。また、生産機器のように、直接加振力を測定することが難しい加振源を対象に、床スラブの応答値から加振力波形を推定するための手法についても検討を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) D.E.Allen : Building Vibrations from Human Activities, Concrete International, Vol.12, No.6, pp.66～73, 1990.6
- 2) D.E.Allen : Floor Vibrations from Aerobics, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.17, No.5, pp.771～779, 1990.10
- 3) 鈴木敏夫, 大山秀美, 田中清 : 居住床の振動予測・評価に関する研究 その1 研究目的および歩行荷重実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.347～348, 1995.8
- 4) 田中靖彦, 伊藤嘉朗 : 床振動の予測手法に関する考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.297～298, 1997.9
- 5) 横山裕 : 歩行時に発生する床振動評価のための加振, 受振装置に関する研究 動的加振器, 受振器の設定および妥当性の検討, 日本建築学会構造系論文集, 第466号, pp.21～29, 1994.12
- 6) 横山裕, 後藤正幸 : 歩行時に発生する床振動評価のための加振, 受振装置に関する研究 衝撃的加振器の開発および振動減衰時間算定方法の妥当性の確認, 日本建築学会構造系論文集, 第476号, pp.21～30, 1995.10
- 7) 富田隆太, 井上勝夫 : 床振動測定用標準衝撃源としてのインパクトボールの有用性, 第25回振動環境シンポジウム資料, pp.7～12, 2007.1
- 8) 平河貴美男編 : JIS A 1418-2 建築物の床衝撃音遮断性能の測定方法—第2部 : 標準重量衝撃源による方法, (財)日本規格協会, 2000.1
- 9) 日本建築学会編 : 建築物荷重指針・同解説(2004), (社)日本建築学会, pp.211～223, 2004.9
- 10) 田中靖彦, 出口清孝, 境茂樹 : 人の動作による動的荷重係数, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.273～274, 2003.9