人の歩行による床振動に関する V 値応答スペクトルの提案と検証

PROPOSAL AND VERIFICATION OF V-VALUE RESPONSE SPECTRUM
IN FLOOR SLAB VIBRATIONS DUE TO HUMAN WALK

増田 圭司*, 中山 昌尚**, 小河 利行***

Keiji MASUDA, Masanao NAKAYAMA and Toshiyuki OGAWA

This paper proposes the walking vibration V-value response spectrum as an evaluation method of the habitability index V-value derived from a Monte-Carlo simulation and shows verifications with actual walking tests. The following conclusions were obtained.

- 1 Monte-Carlo simulations using stochastic walking force model were carried out. The effects of each parameter were clarified, such as the natural frequency, damping coefficient, and the effective mass of the floor slab, the number of people walking, their average body weight, average pacing rate, and the variation of pacing rate of the people walking, and the walking distance.
- 2 The mean values and variation coefficients of V-value are expressed by the natural frequency, the effective mass, the damping coefficient of the floor slab, the average weight per walker and the number of people walking. Based on these functions, the walking vibration V-value response spectrum is proposed.
- 3 The Proposed V-value response spectrums were verified by actual walking tests on seven floor slabs.

Keywords : Floor Slab Vibration, Response Spectrum, Stochastic Estimation, Monte-Carlo Simulation, Walk Force, Walking test

床振動, 応答スペクトル, 確率統計的評価, モンテカルロシミュレーション, 歩行外力, 歩行実験

1. はじめに

人の日常的な動作によって生じる床振動を予測し対策を講じることは、建築物、とりわけ事務所、商業施設などに代表される鋼構造の建物において重要な設計項目の一つである。建築材料の高強度化、ハイブリッド構造の普及などにより、大スパンの床スラブが増加しており、使用者にとって使いやすい快適な空間であるが、反面、揺れやすいという問題を抱えている。

耐震設計と異なり明確な手法が明示されていない環境振動問題ではあるが、「対策検討事例集」¹⁾、「環境振動性能設計ハンドブック」²⁾などが刊行され、実務者のノウハウが蓄積されつつある。

居住性の評価には日本建築学会の居住性能評価指針³⁾が使用されており、2004年版では人の感覚に個人差があることを踏まえ、これを定量的に表した知覚確率での評価が提示されている。目標値としては官庁施設の基準⁴⁾、性能ランク^{2),5)}の文献などに、目安となる値が記載されている。

この指針による評価は検討位置での加速度値に基づく評価であり、試験条件は定められていない。従って実務的には、歩行試験の際の歩行人数と目安となる目標値が設計図書に記載されており、これに基づいて歩行試験などが確認試験として行われる場合が多い。

筆者が既報^{6),7)}で示したように、歩行時の床スラブの振動は、「誰が、どう歩くか」によって大きくばらつくものである。その変動係数は1人歩行時において0.3~0.5程度であり、上記の確認試験の結果はこのばらつきをもつ評価値の単なる1例に過ぎない。こういった問題もあり、文献^{2,8)}においては歩調の倍調波成分と床の固有振動数が共振する条件での検討を推奨している。しかし、完全に共振状態を考えて設計することは逆にむやみに高い性能を要求することにもなりかねない。一方、共振以外にもばらつきの要因はあるが、考慮されない。従ってこの共振具合を含めてばらつきを定量的に評価し、設計者が選択できる状況が望まれている。

筆者らは複数人での歩行加振力の計測データに基づき確率的歩行外力モデルを提案し、この外力モデルを用いたモンテカルロシミュレーションにより、居住性の評価指標となるV値^{6),7)}のばらつきを評価できることを示した⁶⁾。また、渡り廊下において1人及び複数人での歩行実験を行い、歩行時の鉛直振動を数多く計測して評価指標となるV値を算定し、その統計量特性(分布、平均値、変動係数)を把握した。この統計量特性を、確率的歩行外力を改良、拡張して適用したモンテカルロシミュレーションにより算定し、計測結果と対応する解析値を得た。これにより一例ではあるが、確率的

* (株)フジタ 技術センター 修士(工学)
(東京工業大学大学院 博士後期課程 社会人プログラム)
** 小山工業高等専門学校 建築学科 教授・工博
*** 東京工業大学 大学院理工学研究科 建築学専攻
教授・工博

Technology Development Division, FUJITA Corporation, M. Eng.

Prof., Dept. of Arch., National Institute of Technology, Oyama College, Dr. Eng.
Prof., Dept. of Arch. and Building Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

歩行外力を用いたモンテカルロシミュレーションの妥当性を確認した。

V 値は筆者らが文献 6,7 において次のように定義している。V 値とは、応答加速度の 1/3 オクターブバンド分析結果(0-P)を、3～8Hz での加速度と等感覚となるように補正した加速度値(cm/s²)の、中心周波数 3.15Hz～25Hz の 10 帯域における最大値である（詳細は文献 7 参照）。なお、居住性能評価指針³⁾に示されている評価曲線(V-10～90)の値は知覚確率(%)であり、本論文における V 値とは異なる。

本報では、初めにモンテカルロシミュレーションにより床の固有振動数、減衰定数、歩行人数、歩調、歩行距離などのパラメータが、V 値の平均値、変動係数に与える影響を評価する。

次にこのシミュレーション結果から V 値の平均値、変動係数の評価式を作成し、これを歩行振動 V 値応答スペクトルとして提案する。これは耐震設計における加速度応答スペクトルと同様の考え方であるが、平均値と変動係数を設定するという点で大きく異なる新しい概念であり、共振具合が確率により定量的に評価されたものである。

最後に、この歩行振動 V 値応答スペクトルに関して、いくつかの歩行実験に基づいて検証を行う。モンテカルロシミュレーションは既報⁷⁾において渡り廊下での歩行実験により検証を行っているが、これは固有振動数が 7.8Hz であり、歩調の 4 倍調波成分に対する確認である。また、渡り廊下は一方版に近い振動特性を示し、面的な広がりを持つ通常の床スラブとは異なる。そこで、構造形式、固有振動数の異なる床に対しても同様の検証を行う。

なお、本研究の一部はすでに文献 9 で報告しているものである。

2. 歩行振動 V 値応答スペクトルの作成

2.1 モンテカルロシミュレーションの概要

床スラブ上において、様々な人が 1 人、もしくは複数人で歩く状態を想定してモンテカルロシミュレーションを実施した。解析概要を図 1 に示す。床スラブは 1 次振動モードを正弦波半波として SDOF システムに置換し、有効質量、固有振動数、減衰定数を設定した。歩行者は一端から他端まで床スラブ中央を通過するように歩行し、床スラブ中央位置での鉛直方向の応答加速度を評価した。歩行加振力は改良した確率的歩行加振力⁷⁾に基づいて設定した。運動方程式を(1)～(3)に示す。

$$M_s \left(\ddot{z}_i + 2h_s \omega_s \dot{z}_i + \omega_s^2 z_i \right) = q_{0i}(t) \quad (1)$$

$$q_{0i}(t) = \sum_{j=1}^N w_{(j),i} F_{(j),i}(t) \phi(x_{(j),i}) \quad (2)$$

$$x_{(j),i} = v_i t - l_{r(j),i} \quad (3)$$

ここに、 M_s ：床スラブの 1 次モードの有効質量、 $\ddot{z}_i, \dot{z}_i, z_i$ ：床スラブ中央の鉛直加速度、速度、変位、 h_s ：床スラブの 1 次モードの減衰定数、 ω_s ：床スラブの 1 次固有円振動数(= $2\pi f_s$)、 N ：同時に歩行する歩行者の人数、 $w_{(j),i}$ ：歩行者の質量(体重)、 $F_{(j),i}(t)$ ：体重で基準化された歩行加振力^{6,7)}、 $\phi(x)$ ：歩行位置 x における床スラブの振動モード(1 次) (= $\sin(\pi x / \ell_s)$)、 v ：歩行速度、 l_r ：先頭の歩行者との距離、添え字 i は i 回目のシミュレーションを、添え字 j は N 人歩行における j 人目を示す。

床スラブの特性値を表 1 に示す。固有振動数、減衰定数は一般的な建築物の床スラブの特性から、それぞれ 5Hz～15Hz、1%～5%と

図 1 モンテカルロシミュレーションの概要

表 1 床スラブの特性値

床スラブの特性	設定値	備考
有効質量	M_s kg	10,000
固有振動数	f_s Hz	5.0～15.0
減衰定数	h_s %	1, 2, 3, 5
歩行距離	ℓ_s m	9, 12, 15, 18

表 2 歩行者の特性値(統計値)

歩行者の特性	平均値	変動係数
身長	$H_{(j),i}$ cm	170
体重	$w_{(j),i}$ kg	60
歩調	$f_{w(j),i}$ Hz	1.8, 1.9, 2.0
歩行人数	N 人	1, 2, 3, 4, 6, (8, 9, 10)

した。歩行距離は床スラブのスパンを想定し、9m～18mとした。

歩行者の特性値の統計量を表 2 に示す。歩行者及び確率的歩行加振力に関する変数は正規分布を仮定した。確率的歩行加振力は、文献 7 に示すモデルを用い、各パラメータ間の相関性、スパイクの発生確率、スパイクの大きさの変動を考慮した。また、一步ごとの歩調の変動(変動係数 0.02)も考慮している。歩行人数は 1 人～10 人を想定し、3 人までは横 1 列に、4 人以上の場合は横に 2 人並んだ状態を想定した。また、6 人以上の場合は縦に 2 人並び、横に広がった状態での歩行も検討した。前の歩行者との間隔は 1.5m とし、(3)式において考慮した。

シミュレーションは歩調の平均値、変動係数ごとに 2,000 回行い(1 人歩行の場合であれば 2,000 人の歩行に相当)、 $\ddot{z}_i$ から V 値を求め、その統計量(平均値、変動係数)を評価した。床の固有振動数は 0.1Hz 刻み、応答解析の時間刻みは 0.002s とした。得られた V 値(cm/s²)は次式で無次元化し、無次元 V 値 V_N とした。

$$V_N = V \cdot \frac{M_s}{wg} \quad (4)$$

ここに、 M_s ：床スラブの 1 次モード有効質量、 $\bar{w}$ ：歩行者 1 人あたりの平均質量(平均体重)、 g ：重力加速度
従って、複数人歩行の場合は無次元 V 値 V_N に歩行人数 N の影響

が含まれている。

2.2 モンテカルロシミュレーションの結果

(1) V 値の統計量と床の固有振動数の関係

V 値のシミュレーション結果はこれまでと同様に対数正規分布に従うとみなせた^{6,7)}。そこで V 値の統計量 (平均値, 変動係数) について検討する。

図 2, 3 に無次元 V 値 V_N の平均値, 変動係数と床の固有振動数 f_s の関係 (1 人歩行時, 歩行距離 $\ell_s=12\text{m}$, 減衰 $h_s=2\%$) を示す。図 2 は歩調の変動係数 $\sigma_{fv}/\bar{f}_w$ が 0 の場合であり, V_N の平均値では平均歩調 $\bar{f}_w$ の倍調波成分で鋭いピークが見られた。図 3 は歩調の変動係数 $\sigma_{fv}/\bar{f}_w$ を 0.1 とした場合である。 V_N の平均値では倍調波成分のピークが消え, f_s の増加に伴い, 緩やかに減少する傾向を示した。また, 平均歩調の影響もあまり見られない。 V_N の変動係数は図 2 と比較すると増加しており, 特に床の固有振動数が小さい場合に増加量が大きい。こちらも平均歩調の影響はあまり見られない。

(2) 歩調の変動係数の影響

図 4 に歩調の変動係数 $\sigma_{fv}/\bar{f}_w$ の影響を示す。1 人歩行時, 歩行距離 $\ell_s=12\text{m}$, 床の減衰定数 $h_s=2\%$, 歩行者の平均歩調 $\bar{f}_w=1.9\text{Hz}$ の結果である。歩調の変動係数の増加に伴い, V_N の平均値での倍調波成分のピークが小さくなり, ピークとピークの間の谷の部分がおおきくなる傾向が確認できる。歩調の変動係数は一般に 0.05~0.1 程度

であり, 統計量を評価する上では倍調波成分のピークは考慮しなくてもよいと考えられる。

なお, 倍調波成分のピークが見られないことが歩調の倍調波成分と床の固有振動数が一致する場合に生じる共振現象を無視できるということではない。歩調の変動を考慮することで, 歩調の平均値の倍調波成分と床の固有振動数が一致した場合にも歩調の変動によって共振が生じない場合もあり, 逆に歩調の平均値の倍調波成分と床の固有振動数が一致しない場合にも, 歩調の変動によって共振が生じる場合もある。歩調の変動を考慮することで V 値の平均値と床の固有振動数の関係は平滑化されるのである。

(3) 床スラブの減衰定数の影響

図 5 に減衰定数 h_s の影響を示す。図は 1 人歩行時, 歩行距離 $\ell_s=12\text{m}$, 平均歩調 $\bar{f}_w=1.9\text{Hz}$, 歩調の変動係数 $\sigma_{fv}/\bar{f}_w=0.1$ の結果である。減衰定数の増加に伴い, V_N の平均値, 変動係数ともに減少する傾向が確認できる。図 6 は図 5 の $h_s=2\%$ の結果を基準として, その比率を図化したものである。 V_N の平均値の比率は床の固有振動数 f_s によらず概ね一定である。 V_N の変動係数の比率は f_s の増加に伴い, 1 に近づく傾向を示した。

(4) 歩行距離の影響

図 7 に歩行距離 ℓ_s の影響を示す。図は 1 人歩行時, 減衰定数 $h_s=2\%$, 平均歩調 $\bar{f}_w=1.9\text{Hz}$, 歩調の変動係数 $\sigma_{fv}/\bar{f}_w=0.1$ の結果である。歩

図 2 平均歩調 $\bar{f}_w$ の影響
(1 人歩行時, $\ell_s=12\text{m}$, $h_s=2\%$, $\sigma_{fv}/\bar{f}_w=0.0$)

図 3 平均歩調 $\bar{f}_w$ の影響
(1 人歩行時, $\ell_s=12\text{m}$, $h_s=2\%$, $\sigma_{fv}/\bar{f}_w=0.1$)

図 4 歩調の変動係数 $\sigma_{fv}/\bar{f}_w$ の影響
(1 人歩行時, $\ell_s=12\text{m}$, $h_s=2\%$, $\bar{f}_w=1.9\text{Hz}$)

図 5 減衰定数 h_s の影響
(1 人歩行時, $\ell_s=12\text{m}$, $\bar{f}_w=1.9\text{Hz}$, $\sigma_{fv}/\bar{f}_w=0.1$)

図 6 減衰定数 h_s の影響
(1 人歩行時, $\ell_s=12\text{m}$, $\bar{f}_w=1.9\text{Hz}$, $\sigma_{fv}/\bar{f}_w=0.1$)

図 7 歩行距離 ℓ_s の影響
(1 人歩行時, $h_s=2\%$, $\bar{f}_w=1.9\text{Hz}$, $\sigma_{fv}/\bar{f}_w=0.1$)

行距離の影響は見られない。これは、評価対象としている床の固有振動数が 5Hz～15Hz に対して、最も歩行距離が短い 9m の場合においても歩調の倍調波成分と床の固有振動数が共振するだけの十分な歩行時間が確保されており、歩行距離が長くなってもその影響が見られなかったためと考えられる。

(5) 歩行人数の影響

図 8 に歩行人数 N の影響を示す。歩行人数の増加に伴い、 V_N の平均値が増加し、変動係数が減少する傾向が確認できる。図 9 は図 8 の $N=1$ (1 人歩行) の結果を基準として、その比率を図化したものである。 V_N の平均値の比率、変動係数の比率ともに床の固有振動数 f_s によらず概ね一定とみなせる。

そこで、図 9 の縦軸の平均値を歩行人数 N の代表比率とし、歩行人数 N との関係を示したものが図 10 である。図 10 には、 $h_s=2\%$ のほかに、同様に求めた $h_s=5\%$ の結果、 $N=6, 8, 9, 10$ の結果 (歩行時の並び方が異なる場合を含む) についてもあわせて示している。

歩行人数 N の影響はエネルギー的に考えれば、完全にランダムな条件であれば平方根 (0.5 乗) であるとされている^{8,10)}が、本検討では N の 0.5 乗から 0.6 乗の範囲に分布する結果を得た。

歩行人数が多い場合、その並び方の影響を確認した。 $N=6, 8, 10$ の場合に関しては、歩行方向に広がった並び方の場合、 N の 0.5 乗に近づき、歩行直角方向に広がった並び方の場合、 N の 0.6 乗に

図 8 歩行人数 N の影響 ($\ell_s=12\text{m}$, $h_s=2\%$, $\bar{f}_w=1.9\text{Hz}$, $\sigma_{f_w}/\bar{f}_w=0.1$)

図 9 歩行人数 N の影響 ($\ell_s=12\text{m}$, $h_s=2\%$, $\bar{f}_w=1.9\text{Hz}$, $\sigma_{f_w}/\bar{f}_w=0.1$)

図 10 歩行人数 N の影響 ($\ell_s=12\text{m}$, $\bar{f}_w=1.9\text{Hz}$, $\sigma_{f_w}/\bar{f}_w=0.1$)

近づき傾向を示した。これは、検討モデルが 1 方向の振動モードを仮定しており、歩行方向に広がった並び方の場合には外力が分散される効果により応答値が小さくなったためと考えられる。

筆者らの既往の歩行実験⁷⁾においては歩行人数の影響は N の 0.5 乗となる結果を得ているが、ここでは V 値の評価が大きめの評価となる 0.6 乗を採用することとした。

(6) 歩行者体重の変動係数の影響

図 11 に歩行者体重の変動係数 $\sigma_w/\bar{w}$ の影響を示す。図は 1 人歩行時、歩行距離 $\ell_s=12\text{m}$ 、平均歩調 $\bar{f}_w=1.9\text{Hz}$ 、歩調の変動係数 $\sigma_{f_w}/\bar{f}_w=0.1$ の結果である。 $\sigma_w/\bar{w}$ の影響はほとんど見られない。

2.3 歩行振動 V 値応答スペクトルの提案

これらのシミュレーション結果に基づき、人の歩行による床振動の評価指標 V 値の統計量を評価する式として、次式を提案する。

$$(\text{平均値}) \quad \bar{V} = \frac{\bar{w}g}{M_s} N^{0.6} \sqrt{\frac{0.02}{h_s}} \cdot 2 \exp(-0.15f_s) \quad (5)$$

$$(\text{変動係数}) \quad \sigma_V/\bar{V} = N^{-1/4} \cdot \left(\frac{0.02}{h_s} \right)^{1/4} \cdot \max(1.3 - 0.1f_s, 0.5) \quad (6)$$

ここに、 $\bar{w}$: 歩行者の 1 人あたりの平均質量 (平均体重: kg), g : 重力加速度 (980cm/s²), M_s : 床スラブの 1 次モー

図 11 歩行者体重の変動係数 $\sigma_w/\bar{w}$ の影響 (1 人歩行時, $\ell_s=12\text{m}$, $h_s=2\%$, $\bar{f}_w=1.9\text{Hz}$, $\sigma_{f_w}/\bar{f}_w=0.1$)

図 12 無次元 V 値 V_N の超過確率 (1 人歩行時, $h_s=2\%$)

図 13 無次元 V 値 V_N の確率密度分布 (1 人歩行時, $h_s=2\%$)

表3 歩行実験を実施した床スラブの一覧

対象床	用途	床スラブ	柱	大梁	小梁	備考	長辺(m)	短辺(m)	固有振動数 (Hz)	減衰定数	有効質量 (kg)
S1	渡り廊下 ⁷⁾	デッキスラブ	RC造	鉄骨造	鉄骨造	竣工後	12.5	2.5	7.8	2.5%	11,500
S2	事務所	RC造	RC造	混合構造梁	鉄骨造	躯体時	12.8	6.4	14.6	3.5%	26,500
S3	事務所	デッキスラブ	鉄骨造	鉄骨造	鉄骨造	躯体時	13.7	7.2	7.7	5.0%	15,200
S4	事務所	ALC板+トップコン	鉄骨造	鉄骨造	鉄骨造	竣工後	24.0	12.0	7.0	5.0%	17,400
S5	事務所	デッキスラブ	鉄骨造	鉄骨造	鉄骨造	竣工後	12.0	9.6	9.0	2.0%	19,700
S6A	病院	デッキスラブ	RC造	鉄骨造	鉄骨造	躯体時	12.5	10.7	10.0	4.2%	27,300
S6B							12.5	11.4	10.5	5.0%	25,600

図14 歩行実験を実施した床スラブの一覧

ド有効質量(kg), N : 歩行者の人数, h_s : 床スラブの1次減衰定数, f_s : 床スラブの1次モード固有振動数(Hz)

これらの式は歩行人数 $N=1\sim 10$ 人, 歩行距離 $L_s=9\sim 18$ m, スラブ中央での応答, 1次モードのみ考慮, 平均歩調 $\bar{f}_w=1.8\sim 2.0$ Hz, 歩調の変動係数 $\sigma_{f_w}/\bar{f}_w=0.05\sim 0.1$, 体重の変動係数 $0\sim 0.2$ という条件下での式であるが, ピークのない安定した値を用いて確率的に居住性能の評価指標 V 値の予測が可能となる。図3, 図6に(5), (6)式を重ねて示している。解析結果と提案式は概ね対応している。

(5), (6)式は歩行人数, 歩行者と床の有効質量の質量比, 減衰定数を含んでいるが, 基本的には V 値の統計量と床の固有振動数の関係式である。ここでは, これを歩行振動 V 値応答スペクトルと呼ぶ。一般的な地震動に用いられる応答スペクトルは最大値を評価したものであるが, ここで提案する V 値応答スペクトルは平均値と変動係数を評価するものである。 V 値が対数正規分布を示すことから, V 値の確率分布を簡単に評価することができるという特徴がある。

(5), (6)式を用いて求めた V_N の超過確率と床の固有振動数 f_s の関係を図12に, V_N の確率密度分布と f_s の関係を図13に示す。これらは V_N を対数正規分布とし, 1人歩行時, 床の減衰定数 $h_s=2\%$ とした結果である。 f_s の増加に伴い V_N の中央値が減少し, パラツキが小さくなる傾向が確認できる。ここで示した結果は一例であるが, このような検討方法により, 居住性能の評価指標となる V 値を確率的に予測できる。さらに, 知覚割合で表現された現在の居住性能評価指針⁹⁾を応用して用いることで, 歩行振動に関する信頼性設計が可能となると考えられる。

3. 歩行振動 V 値応答スペクトルの検証

3.1 歩行実験概要

2章において提案した歩行振動 V 値応答スペクトルを検証するために, 歩行実験を実施した。歩行実験は床スラブ上において, 1人, もしくは複数の人間が何往復か歩行した状態において, 床スラブ中

図15 ハンマリング試験により得られた振動モード(対象床:S3)

央での応答加速度を計測するものである。これを複数の床スラブで数多くのデータを取得することにより, V 値の統計量を取得した。

3.2 計測対象とした床スラブ

表3, 図14に計測対象の床スラブを示す。S1～S6Bまでの様々な床スラブを計測対象とした。用途は渡り廊下⁷⁾のほか, 事務所, 病院である。床はRC造のスラブのほか, 合成デッキによるデッキスラブ, ALC板上にコンクリートを打設した床も含まれる。大梁, 小梁はそのほとんどが鉄骨造である。計測は竣工後, もしくは躯体時(仕上げのない状態)である。

歩行実験を実施する前に, ハンマリング試験により床スラブの振動特性を把握した。図15に対象床S3において得られた振動モードの一例を示す。1次モードの固有振動数は7.7Hzであり, 床スラブ中央がモードの腹になるモード形である。3次モードは19.3Hzであり, 床スラブ内にモードの腹が3つ表れる形状である。

他の床スラブについても同様に振動モードを確認し, 1次モードにおいてスラブ中央がモードの腹になることを確認した。得られた1次固有振動数は7Hz～14.6Hzであり, 平均歩調を1.9Hzとすると, 歩調の4～7倍音成分に相当する。減衰定数は2.0%～5.0%, 有効質量は11,500～27,300kgであった。

3.3 歩行実験内容

歩行者は床スラブの端部から他方の端部までまっすぐに歩行し、床スラブ端部で数秒停止したあと、反転して再びまっすぐ歩行する。これを5往復（一部3往復）実施した。歩調は指定せず、自由とした。また、複人数歩行の場合も自由に歩くように指示をし、歩調を合わせるように指示はしていない。

歩行実験の一覧を表4に示す。対象床で1人および複人数の歩行実験を、それぞれ36～200回実施した。歩行者の平均体重は1人歩行の場合63.6～72.2kg、複人数歩行の場合は概ねその人数倍である。体重の変動係数は1人歩行の場合0.104～0.175、複人数歩行の場合は人数の増加に伴い減少している。

計測にはサーボ型加速度計を用い、スラブ中央床上に設置して鉛直方向の加速度を測定した。サンプリング周波数は500Hz（S1、S4は1000Hz）とし、200Hzのローパスフィルターを介してPCにてデジタルデータを計測した。

歩行実験で得られた加速度の時系列波形は、片道分のデータを1回として1/3オクターブバンドスペクトルを求め、人体感覚を補正し、その最大値となるV値を評価した。従って10人で1人歩行試験を行い、1人あたり5往復分のデータを取得した場合、1人あたり片道分では10回分となり、10個のV値が得られ、10人では100個のV値が得られる。このV値の統計量（平均値、標準偏差、変動係数）を取得し、V値応答スペクトルと比較した。

3.4 歩行実験結果の一例

図16に得られた1/3オクターブバンド加速度ピークスペクトルの一例を示す。図は対象床S3、1人および3人歩行時の結果である。どちらも100回分のデータを重ね書きしている。図より、歩行時の床振動に大きなバラツキがあることが確認できる。図にはV値を決定したピーク値を合わせて●で示している。ほとんどが中心周波数8Hzのバンド帯であり、床の1次固有振動数成分(7.7Hz)と考えられる。また、同じバンド帯の中でもピーク値が大きくばらついていることも確認できる。

図17に対象床S3における自由歩行時の非超過確率とV値の関係を示す。図には、実験結果から得られたV値の平均値と標準偏差から対数正規分布を仮定して求めた非超過確率（確率分布関数）をそれぞれ線で示している。図より、実験結果から得られたV値の非超過確率と確率分布関数は概ね対応している。なお、示していないが、他の床スラブでの実験結果も同様であった。従って、本実験結果もこれまでと同様にV値の確率分布は対数正規分布に従うとみなすことができ、シミュレーション結果④、歩行実験結果⑦と対応している。

3.5 歩行振動V値応答スペクトルと実験結果の対応

図18に(5)式、(6)式（歩行振動V値応答スペクトル）から求めたV値の統計量の計算値と、歩行実験から得られたV値の統計値の比較を示す。実験結果の最大値は、実験ケースごとに得られた最大のV値としている。計算値の最大値は、対応する実験の回数から非超過確率を設定し、平均値、変動係数から確率的に求めた値である。図には構造特性の異なるS1～S6Bにおいて、1人～6人までの結果を示している。やや計算値が大きめではあるが、実験値と計算値は概ねよい対応を示しており、歩行振動V値応答スペクトルの妥当性を確認した。

表4 歩行実験一覧

対象床	歩行人数	組数 × 回数	合計	歩行者全員の体重	
				平均(kg)	変動係数
S1	1人	20 × 10 (5往復)	200	63.6	0.175
	2人	10 × 10 "	100	121.1	0.090
	6人	10 × 10 "	100	372.3	0.056
S2	1人	12 × 10 "	120	68.4	0.104
	2人	12 × 10 "	120	136.8	0.083
S3	1人	10 × 10 "	100	72.2	0.136
	3人	10 × 10 "	100	215.5	0.080
S4	1人	10 × 10 "	100	70.6	0.161
	2人	10 × 10 "	100	139.0	0.098
	6人	10 × 10 "	100	415.0	0.073
S5-X	1人	7 × 10 "	70	67.9	0.163
	2人	7 × 6 (3往復)	42	135.7	0.132
S5-Y	1人	7 × 10 (5往復)	70	67.9	0.163
	2人	7 × 6 (3往復)	42	135.7	0.106
S6A	1人	13 × 10 (5往復)	130	69.2	0.156
	2人	6 × 6 (3往復)	36	138.3	0.087
S6B	1人	13 × 10 (5往復)	130	69.2	0.156
	2人	6 × 6 (3往復)	36	138.3	0.087

注) S5-XとS5-Yは同じ床で歩行経路が異なる。

図16 1/3オクターブバンド加速度ピークスペクトルとV値
(対象床：S3、上：1人歩行、下：3人歩行、100回分の重ねがき)

図17 V値の非超過確率（対象床：S3、1人及び3人歩行時）

図 1-8 V 値の実験値と計算値の対応

4. まとめ

本研究では、確率的歩行外力を用いた SDOF システムでのモンテカルロシミュレーションを行い、影響する各パラメータを考慮した歩行振動 V 値応答スペクトルを提案した。次に歩行振動 V 値応答スペクトルをいくつかの床スラブで実施した 1 人および複数人での歩行実験結果と比較し妥当性を確認した。得られた結論を以下に示す。

- 1) 確率的歩行外力を用いた SDOF システムでのモンテカルロシミュレーションを行い、各パラメータが V 値の平均値、変動係数に与える影響を示した。歩調の倍調波成分と床の固有振動数が一致する場合に共振現象により V 値が大きくなるが、歩調の変動係数を考慮することで歩調の倍調波成分のピークが小さくなり、ピークとピークとの間の谷の部分が大きくなり、結果として平滑化されることを示した。
- 2) V 値の平均値、変動係数に与える減衰定数、歩行人数の影響を示した。筆者らの提案した確率的歩行外力モデルによるモンテカルロシミュレーションにより、V 値の平均値は歩行人数の 0.5 乗から 0.6 乗に比例する結果を得た。
- 3) V 値の平均値、変動係数が床の固有振動数、有効質量、減衰定数、歩行者 1 人あたりの平均体重、歩行人数を変数とした関数で表されることを示し、これを歩行振動 V 値応答スペクトルとして提案した。
- 4) 提案した歩行振動 V 値応答スペクトルをいくつかの床での歩行実験結果と比較し、この提案式の妥当性を確認した。

謝辞

歩行実験に際しては多くの方々のご協力を頂きました。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) 日本建築学会 環境工学委員会 環境振動運営委員会：環境振動問題に関する対策検討事例集，第 26 回環境振動シンポジウム資料，2008.1
- 2) 日本建築学会：環境振動性能設計ハンドブック，2010.10
- 3) 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
- 4) 国土交通省大臣官房官庁営繕部監修，官庁施設の基本的性能基準及び同解説 平成 18 年版，pp.108-114，2006
- 5) 野田千津子，石川孝重：床振動に対する居住者意識に基づいた性能ランクの設定に関する研究，日本建築学会環境系論文集，第 74 巻，第 638 号，pp.435-441，2009.4
- 6) 中山昌尚，増田圭司，中村佳也：バラツキを考慮した歩行荷重による床スラブの振動評価，構造工学論文集，Vol.57B，pp.93-100，2011.3
- 7) 増田圭司，中山昌尚，小河利行：人の歩行による床振動の確率統計的評価—渡り廊下における歩行実験および確率的歩行外力を用いたモンテカルロシミュレーション—，日本建築学会環境系論文集，第 78 巻，第 692 号，pp.741-747，2013.10
- 8) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，2015.2
- 9) 増田圭司，中山昌尚，小河利行：人の歩行時の床振動に関する V 値応答スペクトルの提案，日本建築学会大会学術講演梗概集，環境工学 I，pp.397-398，2013.8
- 10) 橋本嘉之，柳井 正，中村喜久雄，中野時衛，櫛田 裕，木村栄一：大スパン床の防振構造設計，その 2 多人数加振時の床振動と居住性能評価，日本建築学会大会学術講演梗概集 B，構造 I，pp.1097-1098，1992

PROPOSAL AND VERIFICATION OF V-VALUE RESPONSE SPECTRUM IN FLOOR SLAB VIBRATIONS DUE TO HUMAN WALK

Keiji MASUDA^{}, Masanao NAKAYAMA^{**} and Toshiyuki OGAWA^{***}*

^{*} Technology Development Division, FUJITA Corporation, M. Eng.

^{**} Prof., Dept. of Arch., National Institute of Technology, Oyama College, Dr. Eng.

^{***} Prof., Dept. of Arch. and Building Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

This paper proposes walking vibration V-value response spectrum as an evaluation method of habitability index V-value by Monte-Carlo simulation and shows verifications of these proposed spectrums by actual walking tests.

Firstly, Monte-Carlo simulation was carried out using SDOF system. The situations assumed in the simulation were, various people, one person or more than one person, walking straight in the middle of the floor slab from one end to the other end. The floor slab was modeled as a SDOF system of the first mode. The evaluation point was the center of the floor slab. The stochastic walking force model proposed by authors was used as walking forces.

The parameters of Monte-Carlo simulation were followings. 1) the number of people walking (1, 2, 3, 4, 6, 8, 9 and 10 people), 2) The walking distance (that is span of floor slab; 9, 12, 15, 18m), 3) the natural frequency of the floor slab (5-15Hz, @0.1Hz), 4) the damping coefficient (1%, 2%, 3%, 5%), 5) the average pacing rate of walking (1.8 Hz, 1.9 Hz, 2.0Hz) 6) the variation coefficient of the pacing rate (0, 0.02, 0.05, 0.1). The analysis was carried out 2000 times for every case and the representative statistical values of V-value (mean and variation coefficient) were evaluated.

For each parameter the effects on mean and variation coefficient of V-values were estimated from the analytical results obtained. When harmonic component part of walking pacing rate closed to the natural frequency of floor slab, resonance phenomena occurs and the mean of V-values increases sharply. But smoothness in this peak of V-value is seen when considering the variation of pacing rate. The effects of damping coefficient of floor slab and number of people walking were also indicated. The effect of walking distance was not seen in Monte-Carlo simulation.

Based on this result, the mean and variation coefficient of V-value can be expressed as simple functions of the natural frequency, the effective mass and damping coefficient of the floor slab, the average weight per person walking and the number of people walking. These functions were proposed as walking vibration V-value response spectrum using these expressions.

Walking tests were carried out on seven floor slabs in order to verify this proposed V-value spectrum. One person or more than one person walked multiple times in actual walking tests, and statistical characteristics of experimental V-value (mean and variation coefficient) were acquired. Also, kinematic characteristic of the floor slabs such as natural frequencies and vibration modes were acquired by hammering test conducted at the same time.

The calculation result by proposed walking vibration V-value response spectrum was compared with test results, and adequacy of proposed formula were verified.

(2015 年 3 月 31 日原稿受理, 2015 年 8 月 4 日採用決定)