

人の歩行による床振動のバラツキを考慮した評価

増 田 圭 司

概 要

本論文は、バラツキを考慮した人の歩行時の床振動評価について述べたものである。渡り廊下において、1 人及び複数人での歩行実験を行い、応答加速度から求まる居住性評価指標 (V 値) の統計量 (平均値, 標準偏差, 変動係数, 分布形状) を把握した。得られた実験結果から, V 値は対数正規分布に対応すること, 平均値は歩行人数の平方根に比例して増加すること, 変動係数は歩行人数の増加に伴い徐々に減少することを明らかにした。次に, 先に提案した確率的歩行外力を改良, 拡張した上でモンテカルロシミュレーションに導入して歩行実験を解析的に検証し, 統計量が数値シミュレーションにより評価できることを示した。

Stochastic estimation in floor slab vibrations due to human footfall

Abstract

This paper estimates vibrations in floor slabs caused by people walking stochastically. One or more people walked along a simply supported pedestrian corridor connecting two buildings in order to clarify the statistics of response accelerations. The parameters of the walking tests were the number of walkers, their walking pace and the degree of synchronization of their walking pace. The distribution of the response values followed a log-normal distribution, with average values proportionate to the square root of the number of people walking, and variation coefficients reducing gradually as the number of people increased. These experimentally obtained effects were simulated using Monte-Carlo method with an improved, extended stochastic walk force model developed by authors.

キーワード: 歩行外力、歩行実験、確率統計の評価、
床振動、モンテカルロシミュレーション

§1. はじめに

人の歩行時の床振動問題は古くからある問題であり、外力の評価、応答の評価など様々な研究がなされている。また、数値解析を用いた予測システムも開発され、鋼構造物など比較的大スパンで床振動が懸念される案件などに数多く適用されている^{例え 1)}。

居住性の評価に際しては日本建築学会の居住性能評価指針が一般的に使用されており、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²⁾。

居住性の評価には応答加速度、速度、変位から何らかの指標を求めて行いが、計画段階において、その応答値は応答解析により求めるのが一般的である。応答解析により得られた予測値はバラツキが大きく、同じ建物で検討しても担当者により結果が大きく異なるという問題も生じている³⁾。

床振動などの人の動作による振動問題は、歩調の倍音成分と床の固有振動数の共振問題である。外力は線スペクトル的な様相を呈し、共振現象が生じるか否かの影響が大きい。しかし、加振源は人であり、機械のように常に一定の動作をするわけではなく、加振力は個々人の特性に大きく依存する。従って、応答値のバラツキも大きく、誰が、どのように歩くかによって応答波形は異なる。

筆者らはこういった背景を踏まえ、確率的に表現された歩行外力を提案し、これを用いた SDOF システムでのモンテカルロシミュレーションを実施した⁴⁾。得られた応答加速度波形から現行の評価基準で多く用いられている 1/3 オクターブバンド分析による加速度最大値(0-Peak)を算定し、この値が対数正規分布となることを示した。さらにこの統計量(平均値、標準偏差、変動係数)の算定手法を提示した。

本研究では、実構造物において 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値(V 値)を算定し、その分布、統計量を把握する。次に、先に提案した確率的歩行外力を改良、拡張してモンテカルロシミュレーションを行い、V 値の統計量を解析的に評価し、実験結果と比較することでその妥当性を確認する。

§2. 歩行実験概要

2.1 渡り廊下の概要

実験は小山工業高等専門学校(栃木県小山市)にある管理棟と図書館の間に 2 階レベルに設置された渡り廊下で実施した。渡り廊下の外観写真を写真 1 に、平面図、断面図を図 1 に示す。渡り廊下の全長は約 21m、全幅は 2.47m であり、4 本の鉄筋コンクリート造の支柱で支えられている。渡り廊下の床面は長手方向、短手方向に H 形鋼の大梁、

小梁があり、その上にデッキプレートを通じて軽量コンクリートのスラブ(厚さ 50~100mm)が設置されている。

2.2 渡り廊下の振動特性

歩行実験の前に、渡り廊下の振動特性を得るためにかかと加振実験を行った。得られた加速度波形からフーリエ振幅スペクトルを求め、固有振動数、減衰定数を求めた。表 1 に結果を示す。1 次固有振動数は 7.8Hz、減衰定数は 2.5%であった。また、この振動特性を数値解析により確認した。得られた固有振動数、有効質量を表 1 に、1 次の振動モードを図 2 に示す。



写真 1 渡り廊下の外観

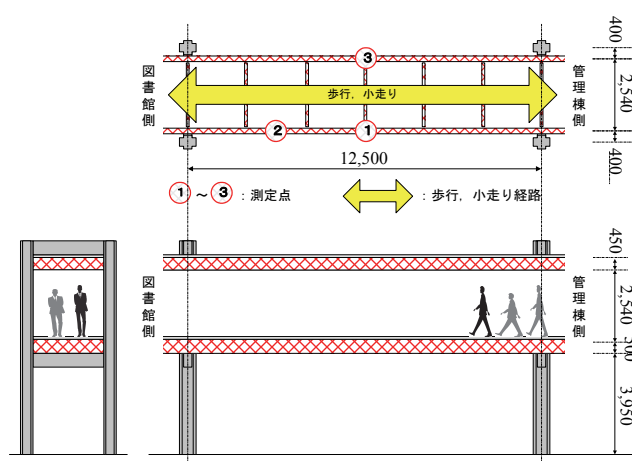


図 1 渡り廊下の平面図と断面図

表 1 渡り廊下の固有振動数と減衰定数、有効質量

	実験値 (減衰定数)	解析値 (有効質量*)
1 次	7.8Hz (2.5%)	7.9Hz (11519kg)
2 次	18.4Hz (2.5%)	17.6Hz (6395kg)

※ 有効質量はモード形の最大値を 1 に基準化して算定した。



図 2 固有値解析結果
(1 次モード)



写真 2 歩行実験の状況
(6 人歩行時)

2.3 歩行実験方法

歩行実験の状況を写真2に、計測ケース一覧を表2に示す。1組の歩行人数は1人、2人、6人の3通りとした。歩調は1人歩行の場合は自由歩調、指定歩調の2種類、2人歩行の場合は自由歩調、同期歩調の2種類、6人歩行の場合は自由歩調、同期歩調、指定歩調の3種類とした。同期歩調は、歩行者で意識して歩調を揃えるように指示をして歩行させた。指定歩調ではメトロノームを用い、歩行者に歩調のリズムが聞こえる状態で歩調を指定して歩行させた。

歩行者は20歳前後の10名(男性9名、女性1名)である。歩行者の体重の統計量を表3に示す。

§3. 歩行実験結果

3.1 歩行時の加速度波形

初めに自由歩行の結果を示す。図3に得られた加速度時刻歴波形の1例を示す。図は1人自由歩行時の渡り廊下中央における鉛直加速度時刻歴波形である。5往復の内、ある片道分の波形を示している。歩行者が端部から中央部に近づくにつれ加速度が大きくなり、中央を通過し反対側に進むにつれ徐々に加速度が減少する。また、1歩から次の1歩までの間に振動はあまり減衰せず、歩調の成分よりも固有振動数成分が大きな波形である。

3.2 1人自由歩行時の歩調

1人自由歩行時の加速度波形から求めたフーリエ振幅スペクトルより歩調を求めた。10名の歩行者からそれぞれ10個の歩調を求めた。図4に10名それぞれの歩調の平均値と最大値、最小値、全体での平均値と最大値、最小値を、図5に同様に歩調の変動係数を示す。全体の歩調の平均値は1.92Hz、その変動係数は0.051であった。個々の歩行者の変動を見ると、同じ歩行者であっても歩調は変動しており、その変動係数は0.007~0.034、10名での変動係数の平均は0.02であった。このことより同じ歩行者であっても歩調は常に一定ではなく、時々刻々と変化していると推定される。歩行者ごとの歩調の平均値の変動係数は0.045であった。

3.3 評価量の抽出

得られた鉛直加速度波形は片道分を1データとし、1/3オクターブ分析により加速度の最大値(0-Peak: cm/s²) a_i を算定し、これを(1)式を用いて補正し V_i を求めた。この値は周波数による人体の感覚を補正し、8Hzでの体感と等価となるようにした加速度値である。

$$V_i = \frac{a_i}{\max(1, f_i/8)} \quad (1)$$

ここに、 a_i : 1/3 オクターブバンド加速度最大値(0-peak: cm/s²)

f_i : i 番目のバンド帯の中心周波数 (Hz), $3 \leq f_i \leq 30$ Hz

V_i は 1/3 オクターブバンドのバンド帯数だけ求まる。この最大値を V 値とした。1組5往復のデータから10個の V 値を算定することができ、1ケースにつき10組の計測をおこなっているため、1ケースあたり100個の V 値が得られる。この V 値の統計値について検討を行う。

3.4 自由歩行、同期歩行時の V 値

表4に1人、2人、6人での自由歩行、同期歩行時の V 値の統計量を示す。図6に自由歩行時の非超過確率と V 値の関係を示す。図には表4に示す 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

表2 計測ケース一覧

歩行者	歩調	回数	組数
1人	自由	5往復	10人
	指定 $fw=1.6 \sim 2.4$ Hz, 0.1Hz 刻み	"	各歩調 10人
2人	自由	"	10組
	同期	"	"
6人	自由	"	"
	同期	"	"
	指定 $fw=1.6 \sim 2.4$ Hz, 0.1Hz 刻み	"	各歩調 10組

表3 歩行者の体重(kg)

歩行者	平均	標準偏差	変動係数	最大値	最小値
1人	61.7	8.8	0.14	79.8	52.3
2人	121.1	10.9	0.09	138.9	99.9
6人	372.3	20.7	0.06	398.6	334.0

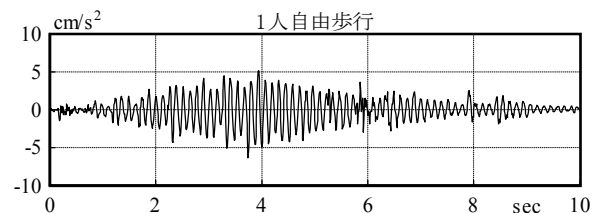


図3 自由歩行時の加速度波形の一例

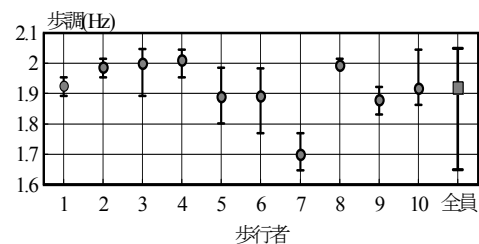


図4 歩調の平均値と最大、最小値(1人自由歩行時)

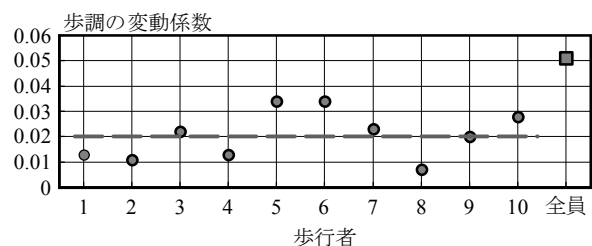


図5 歩調の変動係数(1人自由歩行時)

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、図に示してはいないが、同期歩行、指定歩行の結果も同様であった。従って V 値の確率分布は対数正規分布とみなすことができる。これは文献⁴⁾に示すシミュレーション結果とも対応している。

図 7 に V 値の平均値、標準偏差と歩行人数 N の関係を示す。図には自由歩行時と同期歩行時をあわせて示している。 V 値の平均値は歩行人数 N が増加するにつれて増加する。図には 1 人歩行時の V 値の平均値に、歩行人数 N の平方根を乗じて求めた曲線を示している。両者はよく対応しており、 V 値の平均値は 1 人歩行の値を歩行人数の平方根倍することで推定可能である。 V 値の変動係数は一定ではなく人数が増えるに従い減少する傾向を示す。

自由歩行と同期歩行を比較すると、 V 値の平均値はほぼ同じであった。一方、変動係数は同期歩行の場合、減少傾向が緩やかになる。

3.5 指定歩行時の V 値

図 8 に指定歩行時の V 値の平均値、変動係数と指定歩調の関係を示す。図には 1 人指定歩行と 6 人指定歩行の結果をあわせて示している。渡り廊下の固有振動数 7.8Hz の 1/4 は 1.95Hz となる。この近傍となる歩調 1.9Hz の振動数で平均値は大きくなっており、歩調の 4 倍音成分と渡り廊下の固有振動数による共振振動が生じていると考えられる。変動係数は概ね一定であり、0.3 前後である。6 人の場合の変動係数が 1 人の場合よりも概ね小さくなっており、自由歩行、同期歩行の傾向と同じである。

§4. 歩行振動のシミュレーション

4.1 1 人歩行時の解析方法

3章で示した実験結果をモンテカルロシミュレーションにより検討する。渡り廊下を表 2 に示す特性から 1 質点系に置換して実施した。用いた歩行外力は確率的歩行外力モデルであり、評価位置は渡り廊下中央である。

$$M_0(\ddot{z}_i + 2h_0\omega_0\dot{z}_i + \omega_0^2 z_i) = W_i q_{0i}(t) \quad (2)$$

$$q_{0i}(t) = F_i(t)\phi(x) \quad (3)$$

$$x = v_i t \quad (4)$$

ここに、 M_0 : 渡り廊下の 1 次モードの有効質量、 $\ddot{z}_i, \dot{z}_i, z_i$: 渡り廊下中央の鉛直加速度、速度、変位、 h_0 : 渡り廊下の 1 次モードの減衰定数、 ω_0 : 渡り廊下の 1 次固有円振動数 ($=2\pi f_0$)、 W_i : 歩行者の質量(体重)、 $F_i(t)$: 体重で基準化された歩行外力、 $\phi(x)$: 歩行位置 x における渡り廊下の振動モード(1 次)、 v_i : 歩行速度、添え字 i は i 回目のシミュレーションを示す。

表 4 自由歩行、同期歩行時の V 値の統計量 (cm/s^2)

歩行者	自由歩行			同期歩行		
	平均	標準偏差	変動係数	平均	標準偏差	変動係数
1 人	3.66	1.21	0.33	—	—	—
2 人	5.51	1.62	0.29	6.02	1.89	0.31
6 人	8.60	1.79	0.21	8.24	2.31	0.28

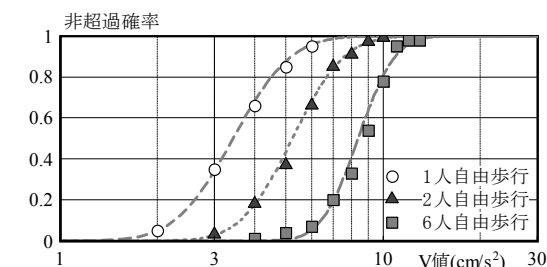


図 6 自由歩行時の V 値の非超過確率

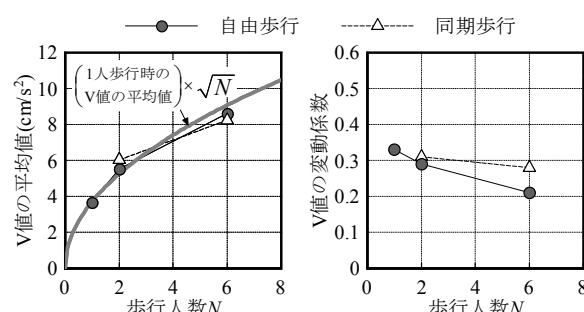


図 7 自由、同期歩行時の V 値の平均値、標準偏差と歩行人数

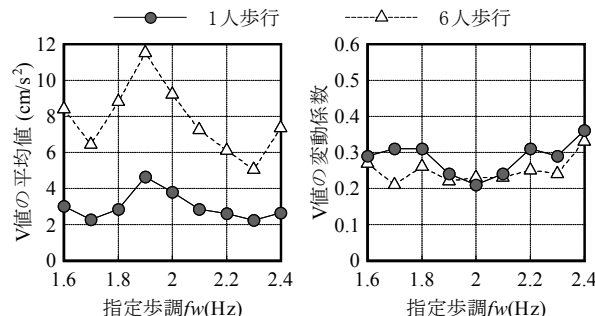


図 8 指定歩行時の V 値の平均値と変動係数

歩行者の体重は表 3 に示す 1 人歩行時の統計量を用い、平均値と変動係数を設定した。応答解析の時間刻みは 0.002sec、1 ケースにつき 2000 回のシミュレーションを行い、 V 値の統計量を求めた。

歩調の設定を表 5 に示す。歩調は 3.2 節に示す結果に基づき、設定した。なお、2 峰形の波形で表される歩行外力の最初の峰の前に現れるピークについては、これも確率的に表現した⁵⁾。

4.2 1 人歩行時の解析結果

図 9 に 1 人自由歩行時の解析値と実験値の比較を示す。図には V 値の最大値、平均値、標準偏差、変動係数を示している。解析の最大値は非超過確率 99% の値とした。Case1-1 の結果は実験値に対して、平均値がやや小さく変

動係数が大きいものの、1 歩ごとの歩調の変動を考慮した Case1-2 においてはその傾向が改善され、解析値と計測値は概ね良い対応を示した。また、図は示していないが解析値の V 値の分布は対数正規分布であった。

図 10 に 1 人指定歩行時の結果を解析値と実験値の比較として示す。1 人指定歩行の歩調の設定は自由歩行時と同様に、1 歩ごとの変動を考慮しない場合(Case1-3)と、考慮する場合(Case1-4)とした。また、歩調の変動係数はメトロノームに合わせていることから 0 とした。V 値の平均値は解析値と計測値で歩調による変化が概ね対応しており、渡り廊下の固有振動数の 1/4 に相当する 1.95Hz 付近でなどらかなピークが現れる。1 歩ごとの変動を考慮しない Case1-3 においては、やや実験値に対して小さめであったが、1 歩ごとの変動を考慮する(Case1-4)ことで改善され、解析値は実験値と概ね対応している。V 値の変動係数は解析値が実験値に対してやや大きめであった。1 歩ごとの変動を考慮することで変動係数は小さくなり、Case1-4 では Case1-3 よりも改善された。ただし、実験においては 2Hz 付近で変動係数が小さくなる傾向を示したが、解析ではその傾向は見られなかった。この原因として共振状態において歩調がその影響を受け同期すること、構造物の減衰の振幅依存性などが考えられる。

以上、1 人歩行時の解析を行い、歩調の倍音と渡り廊下の固有振動数が一致する指定歩調の場合において、やや V 値の変動係数を過大評価する傾向はあるが、それ以外は概ね提案した解析手法により V 値の統計量を評価できることを確認した。

4.3 複数人歩行時の解析方法

複数人歩行時の解析は、(2)、(3)式を(5)、(6)式に置き換えた。

$$M(\ddot{z}_i + 2h\omega_0\dot{z}_i + \omega_0^2 z_i) = \sum_k W_{i,k} q_{0i,k}(t) \quad (5)$$

$$q_{0i,k}(t) = F_{i,k}(t)\phi(v_i t - l_k) \quad (6)$$

ここに、 $W_{i,k}$: k 人目の歩行者の質量(体重)、 $F_{i,k}(t)$: 体重で基準化された k 人目の歩行者の歩行外力、 l_k : k 人目の歩行者の先頭からの距離、添え字 i は i 回目のシミュレーションを示す。

解析に用いた値を表 6 に示す。複数人歩行の場合、同時に歩く歩行者間の歩調の関係を設定する必要がある。ここでは実験にあわせて自由(相関性 $\rho=0$)、同期(相関性 $\rho=1$)の 2 種類を設定した。また、人数が多い場合には、完全に歩調が一致するとは考えにくいので、6 人同期歩行時の歩調については、相関性 $\rho=0.9$ の状態を仮定し、この設定を追加してシミュレーションを行った。

4.4 複数人歩行時の解析結果

図 11 に 2 人自由歩行、同期歩行時の解析値と実験値の

比較を示す。図にはそれぞれ V 値の最大値、平均値、標準偏差、変動係数を示している。自由歩行時(Case2-2a)、同期歩行時(Case2-2b)とも実験値と解析値は概ね良い対応であった。

図 12 に 6 人自由歩行、同期歩行時の解析値と実験値の比較を示す。図にはそれぞれ V 値の最大値、平均値、標準偏差、変動係数を示している。自由歩行時(Case6-2a)の結果は概ね解析値と実験値が良い対応であった。同期歩行時(Case6-2b)の結果は解析値が実験値に対してやや大き目であったが、歩調の相関性を考慮し完全同期とした

表 5 1 人歩行時のシミュレーションに用いた歩調の設定値

Case	歩調	平均値	変動係数	1 歩ごとの歩調の変動係数
1-1	自由	1.92Hz	0.051	—
1-2			0.045	0.02
1-3	指定	$f_w=1.6\sim 2.4\text{Hz}$ 0.01Hz 刻み	0	—
1-4				0.02

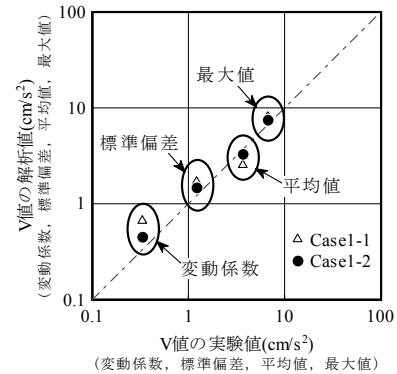


図 9 1 人自由歩行時 V 値の解析値と実験値の比較

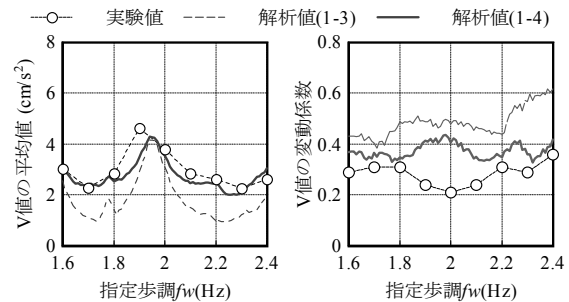


図 10 1 人指定歩行時の V 値の平均値と変動係数

表 6 複数人歩行時のシミュレーションに用いた歩調の設定値

Case	人数	歩調	平均値	変動係数	歩調の相関性 ρ
2-2a	2 人	自由	1.92Hz	0.045	0
2-2b		同期			1.0
6-2a	6 人	自由			0
6-2b		同期			1.0
6-2c					0.9
6-3		指定			1.6～2.4Hz 0.01Hz 刻み

い場合 (Case6-2c: $\rho=0.9$ を仮定) において、解析値は実験値と結果として概ね良い対応となった。

図 13 に 6 人指定歩行時の結果を解析値と実験値を比較して示す。6 人指定歩行の歩調の変動係数はメトロノームに合わせていることから 0 とした。V 値の平均値は解析値が実験値より 1.9~2.0Hz 付近でやや大きくなっているが、歩調の変化に伴う V 値の平均値の変動傾向は捕らえている。V 値の変動係数は解析値と実験値が概ね対応しており、指定歩調にあまり依存しない。

以上、2 人、6 人歩行時の解析を行い、歩調の倍音と渡り廊下の固有振動数が一致する指定歩調の場合において、やや V 値の平均値を過大評価する傾向はあるが、それ以外は概ね提案した解析手法により V 値の統計量を評価できることを確認した。これにより、確率的歩行外力モデルを複数人にまで拡張し、その妥当性を確認したこととなる。

§5. まとめ

本研究では、渡り廊下における 1 人、および複数人での歩行実験、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を行い、以下の結論を得た。

- 1) 1 人歩行時の自由歩調での歩行実験により、V 値 (1/3 オクターブバンド加速度最大値 (0-p) の 8Hz 換算値) を 100 回分取得した。V 値は対数正規分布となり、その変動係数は 0.33 であった。
- 2) 2 人、6 人歩行時の自由、同期歩調での歩行実験を同様に行い、V 値の分布が対数正規分布となり、平均値が歩行人数の平方根に比例して増加した。自由歩調の場合、歩行人数の増加に伴い変動係数は減少したが、同期歩調の場合はややその減少具合が緩やかであった。
- 3) 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を行い、1 人、及び複数人歩行時の歩行実験結果と対応する解析値 (統計量) を得た。

参考文献

- 1) 加藤他: Rayleigh-Ritz 法を応用した床スラブの微振動解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 518 号, pp.147-154, 1999.4
- 2) 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, 2004.5
- 3) 増田他: 歩行等による床振動のブラインド解析 その 1, その 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1, pp.341-344, 2010
- 4) 中山他: 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
- 5) 増田他: 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 692 号, 2013.10 (投稿中)

謝 辞

本研究は小山高等専門学校 建築学科 中山研究室との共同研究として実施したものである。ここに感謝の意を記します。また、東京工業大学大学院 建築学専攻 小河教授にご指導頂いた。あわせて感謝の意を記します。

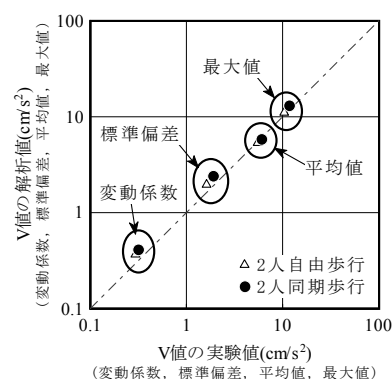


図 11 2 人自由、同期歩行時 V 値の解析値と実験値の比較

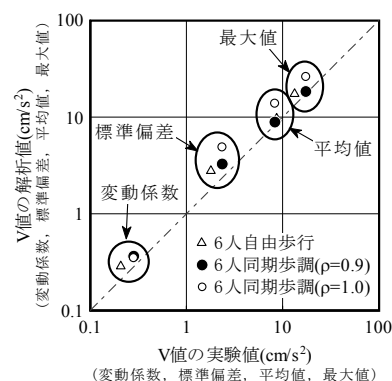


図 12 6 人自由、同期歩行時 V 値の解析値と実験値の比較

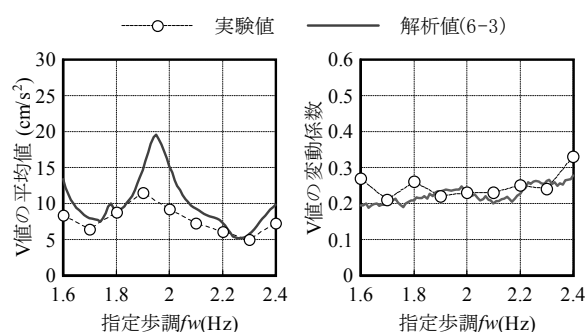


図 13 6 人指定歩行時の V 値の平均値と変動係数



増田 圭司

ひとこと

”あの人が歩くと床が揺れるんだ”という話を聞くことがありますが、実際に計測すると床の振動と歩行者の体重、体型は関係なさそうです。”あれ？なんでこの人の振動が大きくて、この人は小さいの？”なんてことが結構あります。床振動が大きい人は、○○○な人みたいです。