

# 大スパンスラブの振動性能検証結果に基づく評価手法の研究

## アクセラランスによる床振動性能評価手法の提案

野中 康友\* 木田 寛治\*\* 宮川 忠明\*\* 野本 利英\*\*

### Study on Evaluation Method for the Vibration Performance of Slabs Based on a Floor Vibration Test for Large-Span Slabs

Proposal of a means of evaluating the vibration performance of slabs based on an impulse-hammer  
by Yasutomo NONAKA , Kanji KIDA , Tadaaki MIYAGAWA and Toshihide NOMOTO

#### Abstract

Generally the method used to evaluate the vibration performance of slabs involves the execution of F.E.M. analysis by using dynamic force data during estimated men's walking for the resonance of the slabs. The opportunity to measure the vibration performance for large-span slabs at the product facility was taken and examinations were inclusively carried out, in order to gauge the dynamic load of footfall and acceleration of the slabs. In this report, results to facilitate evaluation of the slab performance were referred to.

#### 要 旨

歩行による床振動性能の評価方法は、有限要素法などの解析モデルを用いて、入力する歩行加振力波形を床の固有振動数との共振歩行を想定して作成し、応答解析により予測することが通常行われている。本稿では、生産施設の大スパン PC フラットスラブについて、床振動性能の検証測定を行う機会を得て、歩行などの床加振力について包括的に検討を行い、簡便な解析手法で予測精度の向上に繋がる知見を得たので、その結果について報告する。

キーワード：床振動／アクセラランス／加振力／歩行振動／インパクト加振／居住性能評価

## 1. はじめに

床振動性能の評価法は、一般的に有限要素法などの解析モデルを用いて、入力する歩行加振力波形を床の固有振動数との共振歩行を想定して作成し、予測することが行われている。

ここで問題となるのは大きくモデル化の精度、歩行加振力の設定に絞ることができる。とりわけ歩行加振力については過去様々な研究がなされ、提案されてきている。

本検討では、生産施設ではあるが大スパンのPCフラットスラブについて、床振動性能の検証を行う機会を得て、歩行などの床加振力について包括的に

検討を行い、予測精度の向上に繋がる解析方法について検討を行ったので、その結果について報告する。

## 2. 既往の主な歩行加振力

### 2.1 既往の時刻歴歩行加振力波形

一般的に床の居住性能評価予測時に用いられている代表的な歩行加振力波形を図1に示す。

これらはいずれも歩行加振力を直接計測して得られたものである。

波形(a)は、居住性能に関する環境振動評価の現状と規準[1]（以下、居住性能に関する振動評価規準）に記載されているように、両脚支持時期の考慮

\* 建築本部技術部門

\*\* 技術研究所環境研究室

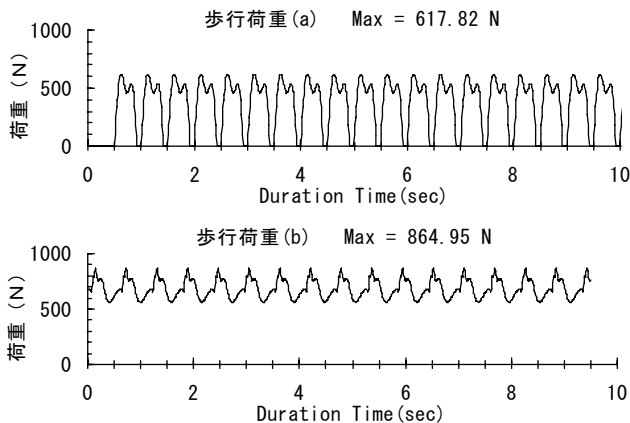


図1 既往の歩行加振力時刻歴波形

がされていないことから、波形(b)を妥当なものとして評価している。

一方、歩行による振動性能を実測により評価する際には、現実の床における共振歩行を考慮して歩行振動数（概ね1.6～2.3Hz）の倍調波が床の固有振動数  $f_0$  に合致するような歩行状態を計測する。

従って、図1に示す波形をそのまま用いることは、このような共振歩行を予測する加振波形としては不適切であると思われる。

居住性能に関する振動評価規準には、歩行一歩当たりの時刻歴波形の諸元に関する詳細な記述がある。この情報によれば、前述の両脚支持期も考慮して二峰波形を求めることができる。

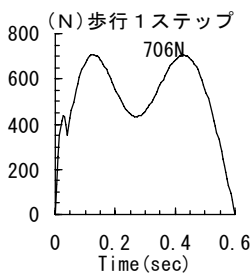


図2 歩行1ステップの荷重

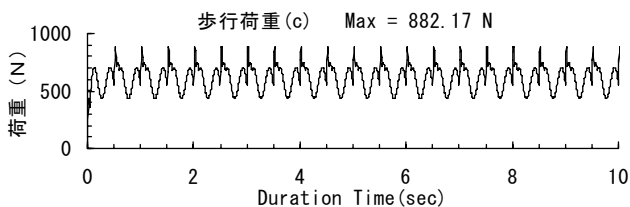


図3 歩行1ステップの重ね合せ（2Hz歩行を想定）

こうして求めた二峰波形（図2）を、床の固有振動数に同調するような振動数ピッチで重ね合わせて、歩行加振力波形とする。図3に2Hzの共振歩行を想定して求めた歩行加振力波形の例を示す。

## 2.2 正弦波の合成による方法

居住性能に関する振動評価規準によれば、人間の連続的な動作による加振力には、一般に加振振動数とその倍調波成分が多く含まれている。例えば歩調0.5sの歩行の場合、歩行ステップである2Hzとその2倍、3倍にあたる4Hz、6Hzの成分が多く含まれている。そして、その倍調波成分は低次ほど大きくなる傾向があるとしている。従って比較的固有振動数が低い床では、加振振動数またはその倍調波と固有振動数の共振により、大きな振動が発生する可能性がある。なお多くの動作の場合、4～5次倍調波以上での共振はほとんど発生しないとされている。

こうした人間の歩行による加振力を複数の正弦波の合成で表現する方法が次式により提案されている。

$$F(t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i W \sin(2\pi i f t) \quad (i = 1 \sim n \text{ 次}) \quad \dots(1)$$

歩行加振力の基本振動数  $f$  の値は、通常1.6～2.3Hzである。 $i$  は倍調波の次数であり  $\alpha_i$  の意味は、 $i$  次倍調波成分の歩行加振者の体重  $W$  に対する割合（静荷重比）を示している。表1に一人歩行と小走りの  $\alpha_i$  を引用して示す。

表1  $f, \alpha_i$  の範囲

	$f$ (Hz)	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$
一人歩行	1.6～2.3	0.38 ～0.5	0.086 ～0.2	0.057 ～0.1	約0.05
一人小走り	2.0～3.3	1.2～ 1.4	0.33 ～0.4	0.1 ～0.15	

4次までの  $\alpha_i$  は、平均的な値として居住性能に関する振動評価規準に示す次の値を用いる。

$$\alpha_1 = 0.4400, \quad \alpha_2 = 0.1430, \quad \alpha_3 = 0.0785, \quad \alpha_4 = 0.0500$$

歩行加振力の基本振動数を  $f = 2.0\text{Hz}$  とした時の時刻歴波形を図4に示す。

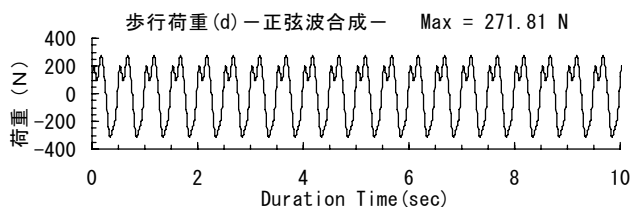


図4 正弦波合成による歩行加振力(2Hz歩行を想定)

なお歩行荷重(d)は、歩行加振者の体重分を基線補正したものであり、応答解析時は(a)～(c)の波形もこのような基線補正を施して利用する。

以上までに述べた4種類の代表的な歩行加振力の設定方法による時刻歴波形を、フーリエスペクトルで比較したものが図5である。図1~4の波形を見ても、図5のスペクトルを見ても、これらはそれぞれ随分様子が異なっている。

またこれらは、いずれも後で述べる実測値から逆解析によって求めたものとは大きく異なっており、低振動数成分をより多く含むものとなっている。

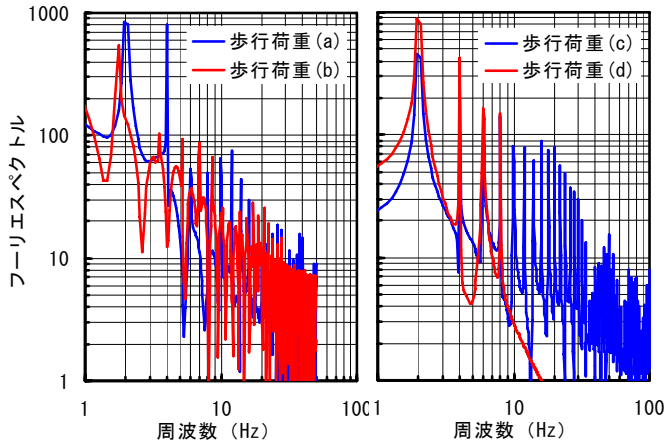


図5 既往歩行加振力のスペクトル比較

### 3. 解析による事前の評価と実測値の比較

ここでは、以上までに述べた加振力に関する知見に基づく事前の解析的検討による振動予測を行い、

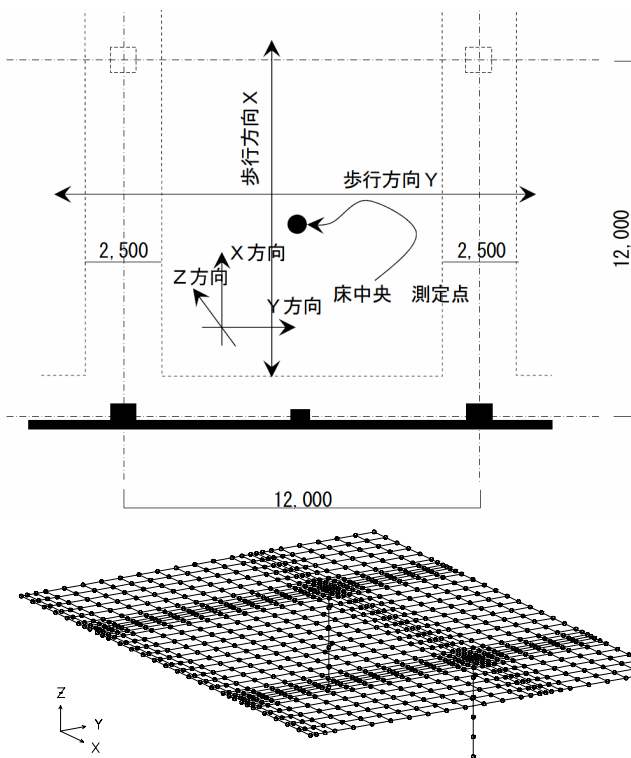


図6 床構造概要図(上)と解析モデル(下)

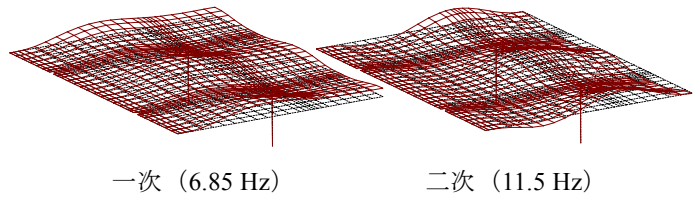


図7 固有値解析結果

実測値との対応について得られた結果を述べる。

検討対象の床構造とその解析モデルを図6に示す。床は12,000×12,000mmの矩形グリッドで床厚は中央部分で250mm、一方向扁平梁の梁幅2500mm梁厚500mm、柱は600×600mm、 $F_c = 30.0\text{N/mm}^2$ である。

解析モデルは外壁側のスパンを対象とし、シェル要素と3次元梁要素を用い軸対象モデルとした。壁際の通りは全節点を固定としている。また、積載荷重は測定時の状況はほとんど無負荷であったため、これを無視している。解析モデルの固有値解析結果を図7に示す。

当該床の固有振動数は、常時微動やヒールインパクト加振の結果からおよそ7.0Hz程度と確認されており、概ね解析モデルは妥当であると思われる。

加振荷重については、歩行荷重と小走り荷重を対象として事前の解析では2.2節に示した居住性能に関する振動評価規準に則り共振歩行荷重を求めた。

ここで歩行と小走りの基本周波数  $f$  は、固有値解析結果よりそれぞれ2.284Hz, 3.43Hzとし荷重特性値  $\alpha_i$  (静荷重比) は範囲で示されている基準値の平均値を採用した。

同様にして一人小走りの時刻歴荷重波形も算出した。図8は、歩行者の体重を784.5Nとし、およそ8秒の歩行を想定し正弦波包絡形を乗じた加振力波形である。

こうして求めた荷重による居住性能予測結果を、計測結果と合わせて、図9に示す。解析値による居

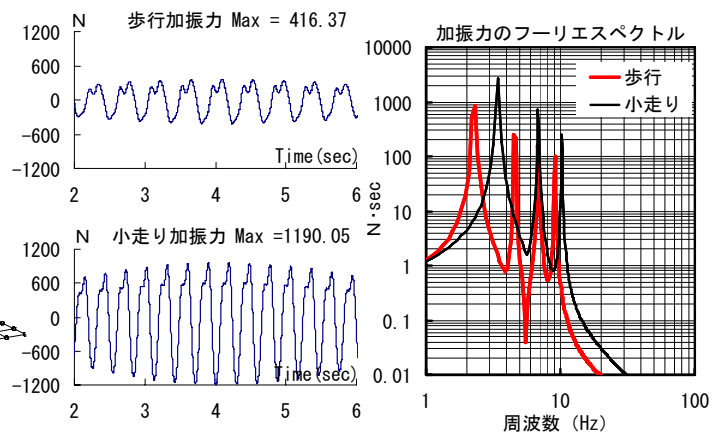


図8 床加振力波形の想定値

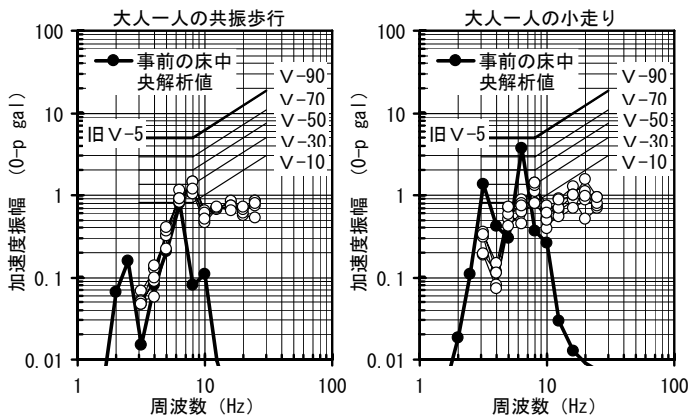


図9 床振動能評価値の比較 (○：実測値)

住性能は計測結果を十分に表現できていない。特に床の固有振動数帯域の精度が悪く、性能値そのものに影響している。

#### 4. インパルスハンマーによるアクセラランスの評価

検討対象モデルの床において床振動性能の実測に加えて床中央をインパルスハンマーで打撃し、アクセラランスを測定した。

ここでは、床中央のアクセラランスについて解析値と実測値とを比較する。

振動測定値のアクセラランス  $G(\omega)$  は、数秒間隔のハンマー打撃波形から打撃時を中心とする前後2秒、計4秒間のデータを10回分抜出し、それぞれのハンマー加振力および床加速度データを用いて、ハンマーの加振力スペクトルを  $X(\omega)$ 、応答加速度のスペクトルを  $Y(\omega)$  (ここで  $X^*(\omega)$  は  $X(\omega)$  の共役複素数) として、次式(2)によって求めた。

また一方、歩行などの加振による床応答計測値を  $R(\omega)$  として、その加振力は式(3)によって求めた。

$$G(\omega) = (\sum Y(\omega) \times X^*(\omega)) / (\sum X(\omega) \times X^*(\omega)) \dots (2)$$

$$F(\omega) = R(\omega) / G(\omega) \dots (3)$$

インパルスハンマー加振によるアクセラランス測定結果を応答解析によるそれと併せて図10に示す。

この結果によれば、解析モデルの精度は概ね良好であることがわかる。

また、図中にはアクセラランス計測値を1/3オクターブ分析した結果も示している。

ここで注意すべき点は、アクセラランスカーブに1/3オクターブ分析処理を施しても、値自体には変化はなく同曲線上の離散点として与えられるということである。即ちアクセラランスを1/3オクターブ分析値として得る場合、あえて1/3オクターブ分析処理を施さなくとも曲線上の値として得ることができることを示している。

このことは、例えば歩行などの加振力波形を1/3オクターブ分析値として整理しておけば、床中央のアクセラランスを求めることが即ち床振動の性能値を求めることと等価となり得ることを示している。

#### 5. 床振動荷重波形の評価

測定した歩行振動加速度波形から荷重波形を逆算により求め、居住性能に関する振動評価規準と比較した。

測定結果のアクセラランスにより、前述の(3)式を用いて歩行・小走りの加振力を求めた結果が図11である。図11は、歩行と小走りについてそれぞれ5回ずつの加振によって測定した加速度波形から逆算して求めた加振力波形のフーリエスペクトルの平均値として示している。

こうして求めた加振力によって、再度応答解析を

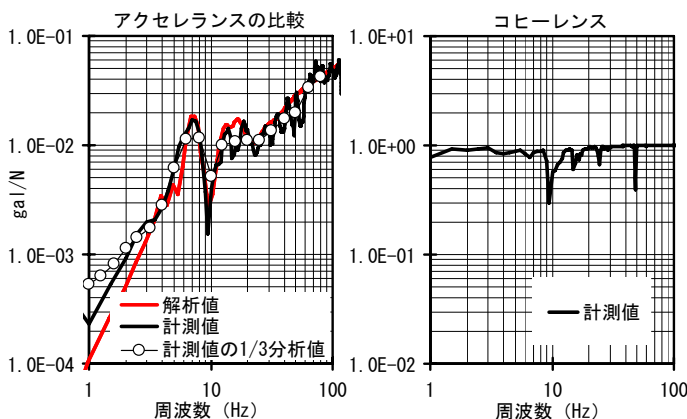


図10 アクセラランスの比較 (右：コヒーレンス)

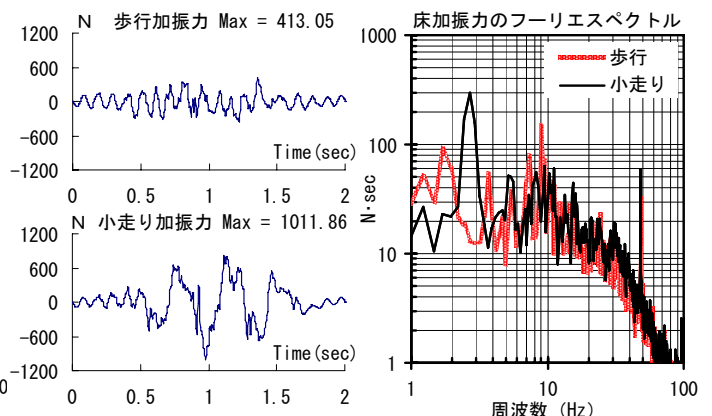


図11 計測値から逆算した加振力

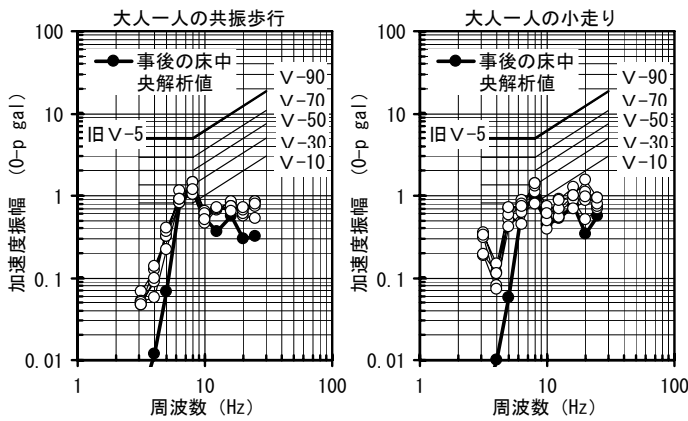


図12 逆算した加振力による床振動評価値

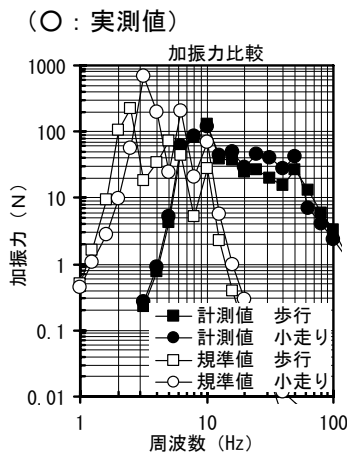


図13 加振力振1/3分析比較

行った結果を図12に示す。

解析結果は、概ね良好に計測値を再現できている。図13は、以上までに述べた歩行と小走りの加振力について1/3オクターブ分析によってその値を比較したものである。規準による加振力の設定法では、低次から高次にかけて荷重特性値 $\alpha$ は漸減するが、少なくとも本ケースでは歩行加振周波数帯域よりはむしろ床の固有振動数帯域で、加振力が大幅に増加していることが判る。また図12の解析値は、図10のアクセラランス1/3分析値を乗じて求めた結果ともほとんど合致していた。

以上までに述べた内容を整理して、以下の知見が得られた。

- 居住性能に関する振動評価規準による歩行加振力は歩行周波数帯域に大きな加振力を有し、10Hz前後における加振力が大幅に低下する傾向にある。
- アクセラランスは1/3オクターブ分析処理を施してもその値は変わらない。
- 加振力を1/3オクターブ値として求め、アクセラランスの1/3オクターブ解析値と乗じることによ

って求めた振動値は、簡便な予測手法として利用できる可能性がある。

従来の性能予測方法と本検討における提案の方法とをフロー図でまとめて図14に示す。

この方法で、加振力に共振歩行を想定した結果が得にくい可能性が指摘される。しかし加振力波形の収集に際しこの点を十分に考慮しておけば、予測精度の向上は期待できるものと思われる。

そこで、以下ではこの方法を用いて別建物における計測値の再現性を調べてみた結果について述べる。

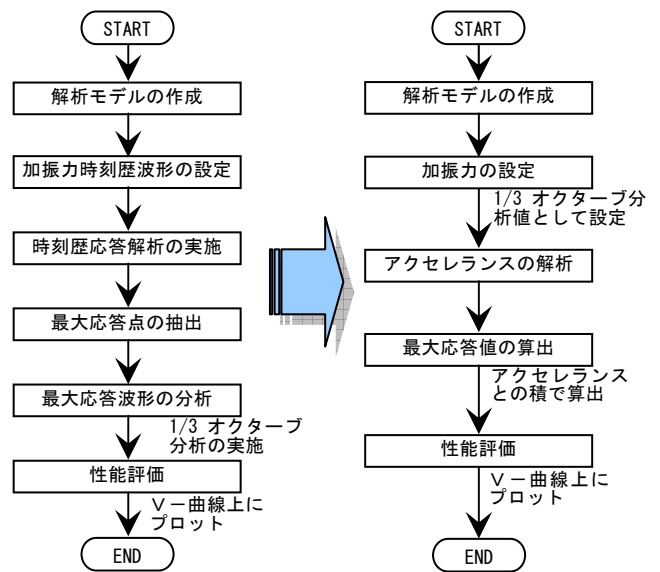


図14 性能予測手法の比較（左：現状、右：提案）

## 6. 事例検証

ここでは、過去に行った床振動性能の実測値が、以上までに述べた方法によってどれだけ再現できるかについて解析的検討を行った。

なお、過去の実測事例では床固有振動数と性能値があるのみで床中央のアクセラランスについては計測を行っておらず、従って加振力波形も求めてはいない。このため以上までに述べた方法による予測手法の精度に関する検証を主目的とする。扱うデータは(i)12×12mスパン床と(ii)12×17mスパン床の2例であり、図15にそれぞれの床構造概要を示す。

合成床版は近似的に等価なコンクリート断面に置換した。なおアクセラランスの解析は、計測データではないので前述の(2)式ではなく、衝撃加振による応答を求め、単純にそれぞれのフーリエスペクトルを除算（応答加速度/加振力）して求めた。

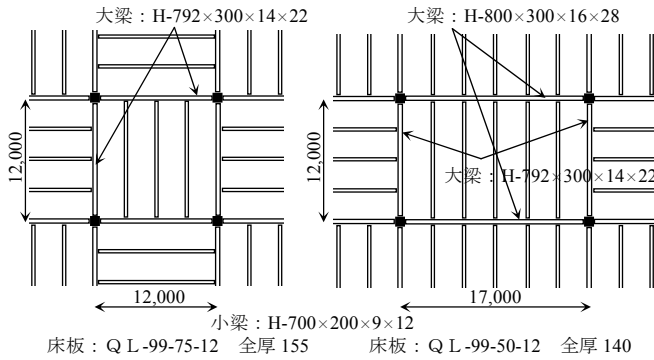


図15 検証事例床構造概要図 (左：(i)12×12m スパン床, 右：(ii)12×17mスパン床)

また、歩行加振力は図13にまとめた1/3オクターブ分析の計測値を歩行と小走り加振についてそのまま用いる。従って比較する計測値はそれぞれ対応する一人共振歩行と小走り加振の評価値とする。

固有値解析結果を図16に、床中央のアクセランス解析結果を図17に示す。また、振動性能評価値について計測値と解析結果とを比較して図18に示す。

提案する方法による振動予測値は、歩行振動についてやや厳しく、小走りについては概ね妥当な評価値を与えている。

以上の検討により、データは少ないもののこの提

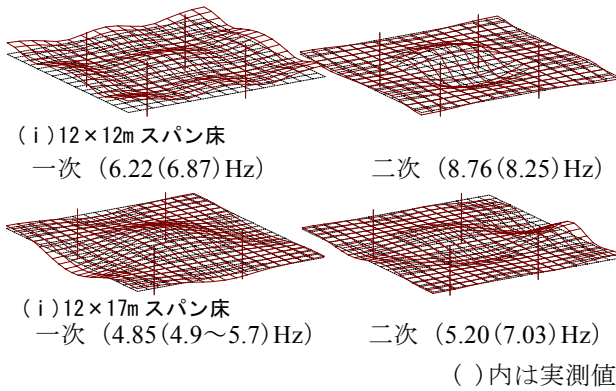


図16 固有値解析結果

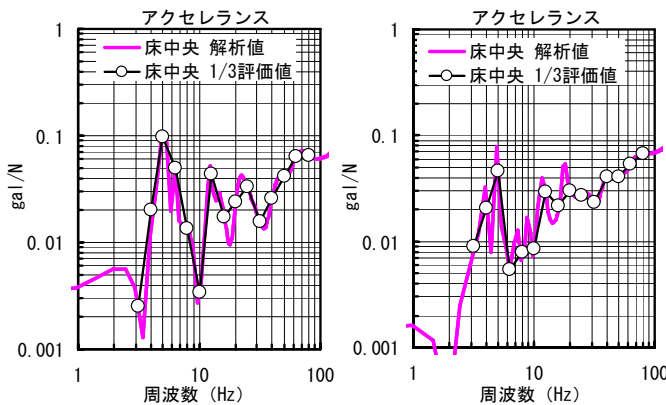


図17 床中央のアクセラランス

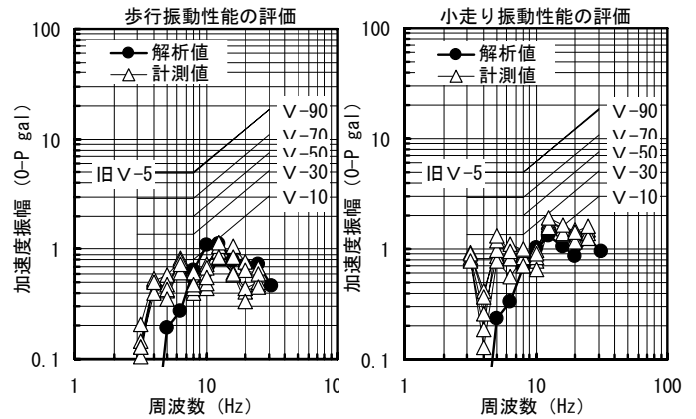
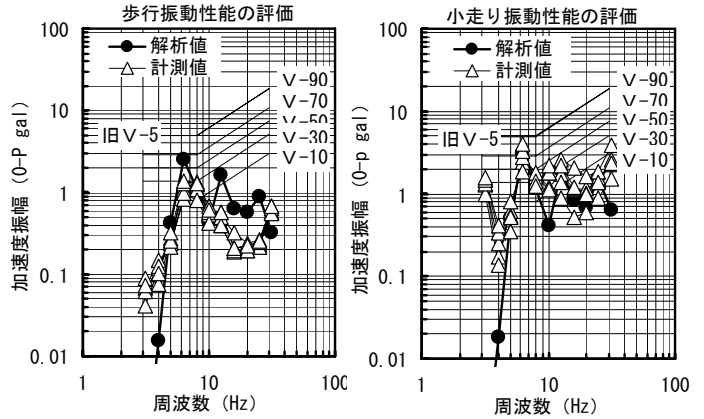


図18 振動性能実測値との比較 (上：(i)12×12m スパン床, 下：(ii)12×17mスパン床)

案手法も振動性能予測手法の一つとして有効であると思われる。

## 7. まとめ

- 1) 少なくとも本検討事例においては、床の固有振動数近辺の帯域における静荷重比  $\alpha i$  は居住性能に関する振動評価規準に示す数値に対してもう少し大きめの値が適切であると思われる。
- 2) 提案手法による振動性能予測手法は簡便であり、概ね妥当な解が得られるものと思われる。
- 3) また今後、振動性能予測の精度を高めるにはアクセラランスの計測により、加振力を1/3オクターブ分析値として求める作業が多く必要である。

## 参考文献

- [1] 日本建築学会：居住性能に関する環境振動評価の現状と規準 2000.6
- [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 2004.5
- [3] 日本音響材料協会：騒音・振動対策ハンドブック 1982.1