

## 人の歩行時の床振動に関する信頼性設計法の提案

増田 圭司

### 概 要

本研究では、歩行振動に関する信頼性設計法を提案し、実際の床スラブに信頼性設計法を適用し、振動実験、歩行実験によりその妥当性を確認した。得られた結論を以下に示す。

- 1) 使用限界状態として振動を不快と感じる加速度を設定し、既報において提案した歩行振動V値応答スペクトルを用いて、1質点系における人の歩行による床振動に関する信頼性設計法の定式化を示した。
- 2) 上記設計法を、歩行者の違いによるばらつき、床スラブの振動特性の予測誤差を考慮し、多自由度系に拡張した。
- 3) 人の歩行による床振動への信頼性設計法の適用例を示し、実建物での振動実験、歩行実験に基づき、その妥当性を確認した。

### Proposal on a reliability based design for limiting floor slab vibration due to human walk

#### Abstract

This paper proposes a reliability-based design for limiting floor slab vibration due to human walking. The reliability design method was applied to an actual floor slab design, and its validity was confirmed by hammering tests and by single-person walking tests using the actual building floor slabs. The following conclusions were obtained.

- 1) The serviceability limit state was set as an acceleration that results in vibrations causing discomfort, and a formulation of the reliability-based design method for limiting floor slab vibration due to human walking was proposed using the walking vibration V-value response spectrum suggested by the author in a previous report.
- 2) This reliability-based design method considered the effects of prediction errors in the vibration characteristics of the floor slab, such as the first natural frequency, damping coefficient, modal mass, and the individuality of walkers. It was also expanded to a system allowing for multiple degrees of freedom.
- 3) An application example of the reliability-based design of floor vibration due to human walking was shown, and the validity of the design objectives was verified based on field experiments including hammering tests and single-person walking tests on the designed actual slabs.

キーワード： 信頼性設計法, 床振動, 確率統計的  
評価, 応答スペクトル, 歩行実験

## §1. はじめに

人の歩行による床振動は、鋼構造建物においては重要な設計項目の一つであるが明確な設計法はなく、担当者の工学的判断に基づいてなされることが多い。従って、外力の設定、解析手法、評価方法など、様々な基準に基づいてなされている。

筆者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を行い、居住性能の評価指標の一つである V 値(鉛直方向応答加速度の 1/3 オクターブバンド分析による加速度最大値の 8Hz 換算値)を評価できることを示した<sup>1)</sup>。次に、渡り廊下での歩行実験により V 値の統計的性質(確率分布、平均値、変動係数)を評価し、この統計量がモンテカルロシミュレーションにより算定可能なことを示した<sup>2)</sup>。さらに、このモンテカルロシミュレーションにより V 値の平均値、変動係数の評価式を帰納し、これを歩行振動 V 値応答スペクトルとして提案した<sup>3)</sup>。この歩行振動 V 値応答スペクトルを用いることで、歩行振動による加速度(V 値)の平均値だけではなく、変動係数、確率分布まで容易に予測可能となった。

一方、確率的なアプローチによる設計法として信頼性設計法、限界状態設計法が挙げられる。人の歩行時の床振動に関して考えてみると、応答値がばらつきをもつだけでなく、人が振動を知覚する加速度、不快に感じる加速度にもばらつきがある<sup>4)</sup>。このような問題に対しては、信頼性設計法が適していると考えられる。

居住性に関する信頼性設計法の研究はすでにいくつか行われている。歩行振動に対する信頼性評価の研究としては塩谷<sup>5)</sup>の研究が挙げられる。塩谷は知覚速度の評価確率 50%の回帰式を用い、変動係数 1.5 の対数正規分布に従うと仮定して知覚確率分布を設定している。歩行荷重のパワースペクトル密度と床スラブの伝達関数(モビリティ)から応答速度のパワースペクトル密度を算定し、最大応答速度を評価して信頼性指標 $\beta$ を求め、居住性能を評価している。しかし、歩行者の違いによる応答値のばらつきは考慮されていない。また、振動系の特性の予測誤差による影響も考慮されていない。

本報では初めに、人の歩行時の床振動に関して、2 次モーメント法に基づく信頼性設計法を示す。使用限界状態として不快に感じる加速度を設定し、応答加速度は既報に示す歩行振動 V 値応答スペクトル<sup>3)</sup>から設定する。次に床スラブの設計段階で既定した信頼性指標 $\beta$ を満足するように設計された建物において、計測結果に基づく $\beta$ が概ね対応していることを示す。

## §2. 信頼性設計法の定式化

### 2.1 2 次モーメント法による信頼性指標 $\beta$ の評価

人の歩行時の床振動に関する信頼性評価の概念図を図 1 に示す。使用限界状態として振動を不快と感じる状態を想定すると、2 次モーメント法に基づく信頼性評価は(1)式となる。

$$R = P - A \quad (1)$$

ここに、 $R$ : 性能関数、 $P$ : 使用限界状態(耐力側)、 $A$ : 応答加速度(荷重効果側)

$P, A$  が対数正規分布とみなされると仮定し、(1)式を次のように再定義する。なお、確率変数  $R$  が 0 より小さい確率を  $P_f$  とすると、これを  $Prob(R < 0) = P_f$  と記載する。

$$R = \ln P - \ln A \quad (2)$$

$$Prob(R < 0) = P_f = \Phi(-\beta) \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\mu_R}{\sigma_R} = \frac{\lambda_P - \lambda_A}{\sqrt{\zeta_P^2 + \zeta_A^2}} \quad (4)$$

$$\lambda_P = \ln \bar{P} - \frac{\zeta_P^2}{2} \quad (5)$$

$$\lambda_A = \ln \bar{A} - \frac{\zeta_A^2}{2} \quad (6)$$

$$\zeta_P = \sqrt{\ln(1 + V_P^2)} \quad (7)$$

$$\zeta_A = \sqrt{\ln(1 + V_A^2)} \quad (8)$$

ここに、 $P_f$ : 振動を不快と感じる確率、 $\Phi(\cdot)$ : 標準正規確率分布関数、 $\beta$ : 信頼性指標、 $\bar{P}$ : 振動を不快と感じる加速度の平均値、 $V_P$ : 振動を不快と感じる加速度の変動係数、 $\bar{A}$ : 応答加速度の平均値、 $V_A$ : 応答加速度の変動係数。

よって、 $\bar{P}, V_P, \bar{A}, V_A$  を設定すると信頼性指標 $\beta$ が求まり、振動を不快と感じる確率  $P_f$ (以下、不快確率とする)を評価することができる。

### 2.2 使用限界状態(振動を不快と感じる加速度: 耐力側)

居住性能評価指針 2004<sup>4)</sup>には鉛直振動に関する性能評価曲線として知覚確率が示されており、3Hz~8Hz の範囲では中央値 2cm/s<sup>2</sup>(平均値 2.56cm/s<sup>2</sup>)、変動係数 0.8 の対数正規分布に基づいている。また、その根拠として文献 6 の図 2 には、鉛直方向の正弦振動に対する被験者実験から得られた「まったく感じない」の回答確率が示されている。この知覚確率と「まったく感じない」、及び対数正規分布の関係の一例を図 1 に示す。図は振動数 7.1Hz の場合である。知覚確率と「まったく感じない」は対応していることが確認できる。図には「まったく不快でない」、「あまり感じないまで」の回答確率も示されており、その曲線は「まったく感じない」とほぼ平行で、それぞ

れ約 2 倍、4 倍と判断できる。他の周波数についても同様の傾向を示した。従って、ここでは使用限界状態を、「まったく不快でない」ことはない状態の加速度」と想定し、中央値  $4\text{cm/s}^2$ (平均値  $5.12\text{cm/s}^2$ )、変動係数 0.8 の対数正規分布の確率分布とした。

$$P \in LN(2.56\psi, 0.8) \quad (9)$$

ここに、 $LN(x_1, x_2)$ : 平均値  $x_1$ 、変動係数  $x_2$  の対数正規確率分布関数、 $\psi$ : 振動を知覚する加速度と不快に感じる加速度の比率(=2)

なお、(9)式は 8Hz 以下の加速度を対象にしている。

8Hz 以上に関しては 8Hz に換算して用いる。

### 2.3 応答加速度(荷重効果側)

$\bar{A}$ 、 $V_A$ については、既報<sup>3)</sup>において提案した歩行振動  $V$  値応答スペクトルにより算定する。この評価式による値は、床スラブ中央での応答加速度に相当する。

$$A \in LN(\bar{A}, V_A) \quad (10)$$

$$\bar{A} = \bar{V} = \frac{\bar{m}g}{M_s} N^{0.6} \sqrt{\frac{0.02}{h_s}} \cdot 2 \exp(-0.15f_s) \quad (11)$$

$$V_A = \frac{\sigma_V}{\bar{V}} = N^{-\frac{1}{4}} \left( \frac{0.02}{h_s} \right)^{\frac{2}{5}} \cdot \max(1.3 - 0.1f_s, 0.5) \quad (12)$$

ここに、 $\bar{V}$ :  $V$  値の平均値、 $\bar{m}$ : 歩行者の平均質量(平均体重: kg)、 $M_s$ : 床の 1 次モード有効質量(kg)、 $g$ : 重力加速度 ( $980\text{cm/s}^2$ )、 $N$ : 歩行人数、 $h_s$ : 床の 1 次モード減衰定数、 $f_s$ : 床の 1 次モード固有振動数(Hz)、 $\sigma_V$ :  $V$  値の標準偏差

なお、 $V$  値は筆者らが文献 1,2 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( $\text{cm/s}^2$ )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 2 参照)。ちなみに、居住性能評価指針<sup>4)</sup>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。

実際の設計においては、床の固有振動数  $f_s$  は設計時に想定した値とは異なる場合が多い。また、減衰定数  $h_s$ 、床の有効質量  $M_s$  も設計値とおりとは限らない。そこで、これらを独立変数と仮定し、1次ガウス近似法により予測誤差を考慮すると(12)式の  $\sigma_V$  は(13)式となる。

$$\sigma_{V'} = \sqrt{\sigma_V^2 + \left( \frac{\partial \bar{V}}{\partial f_s} \sigma_{f_s} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{V}}{\partial h_s} \sigma_{h_s} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{V}}{\partial M_s} \sigma_{M_s} \right)^2} \quad (13)$$

(13)式は歩行者の違いによる応答加速度のバラツキのほかに、床スラブの振動特性に関するパラメータ( $f_s$ 、 $h_s$ 、 $M_s$ )の予測精度の誤差を考慮している。

以上により、2 次モーメント法による居住性能評価が可能となり、人の感覚の違いだけでなく、歩行者の違い、床スラ

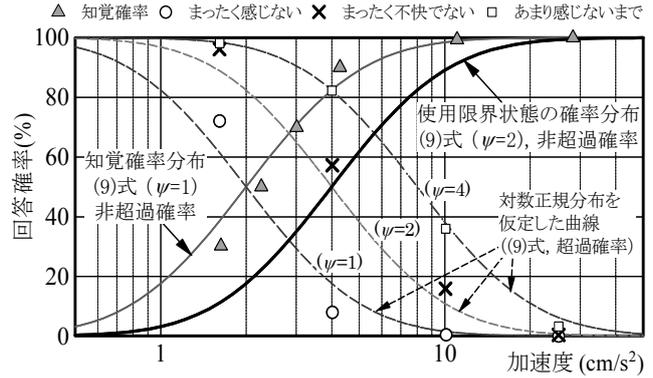


図 1 鉛直振動に対する感覚評価と確率分布関数(7.1Hz の場合)

ブのモデル化誤差を考慮した形で信頼性指標  $\beta$  を算定できる。

### 2.4 多自由度系への拡張

ここまで示した設計法は 1 質点系におけるものである。多くの場合は 1 次モードが問題となるためこの設計法で十分であると考えられるが、2 次、もしくはそれ以上の振動モードが影響することも想定される。また、この設計法で評価している点は床スラブの中央であり、他の位置における評価を行うことも考えられる。そこで、振動モードの形状を考慮して任意位置での評価ができ、複数の振動モードを考慮できるように拡張する。

各次の振動が独立であることから、評価点における各振動モードによる不快確率の和が不快確率であると仮定すると、(3)式は(14)式となる。

$$P_{f,j} = \sum_i P_{f_{i,j}} = \Phi(-\beta_j) \quad (14)$$

ここに、 $P_{f_{i,j}}$ :  $j$  点における不快確率、 $P_{h_{i,j}}$ :  $i$  次モードによる  $j$  点における不快確率、 $\beta_j$ :  $j$  点における信頼性指標

一方、 $i$  次モードによる  $j$  点における応答加速度の平均値  $\bar{A}_{i,j}$  は、(11)式にモードシェイプ係数を考慮し(15)式により、 $i$  次モードによる応答加速度の変動係数  $V_{A_i}$  は(16)式より求める。なお、ここで求まる応答値は、歩行者がモードの最大となる点(1次モードの場合、通常はスラブ中央)を通過するように歩行した場合の値である。

$$\bar{A}_{i,j} = \phi_{i,j} \bar{V}_{ij} = \phi_{i,j} \frac{\bar{m}g}{M_{s,i}} N^{0.6} \sqrt{\frac{0.02}{h_{s,i}}} \cdot 2 \exp(-0.15f_{s,i}) \quad (15)$$

$$V_{A_i} = \frac{\sigma_{V_i}}{\bar{V}_i} = N^{-\frac{1}{4}} \left( \frac{0.02}{h_{s,i}} \right)^{\frac{2}{5}} \cdot \max(1.3 - 0.1f_{s,i}, 0.5) \quad (16)$$

ここに、 $\phi_{i,j}$ :  $i$  次モードの  $j$  点のモードシェイプ係数( $i$  次モードの固有ベクトル  $\{\phi_i\}$  の  $j$  点の鉛直方向成分)、 $M_{s,i}$ : 床の  $i$  次モード有効質量(kg)、 $h_{s,i}$ : 床の  $i$  次モード減衰定数、 $f_{s,i}$ : 床の  $i$  次モード固有振動数(Hz)、なお、固有ベクトル  $\{\phi_i\}$  は成分の絶対値の最大値が 1 になるように基準化している。

従って、振動モードごとに(3)~(13),(15),(16)式を用いて

$i$  次モードによる  $j$  点における不快確率  $P_{h,j}$  を求め、この和から(14)式により  $j$  点における不快確率  $P_{h,i}$ 、信頼性指標  $\beta$  を求めることで、任意点における多自由度系での信頼性設計が可能となる。

### §3. 信頼性設計法の適用と実験による検証

#### 3.1 信頼性設計法による床スラブの設計

ここでは信頼性設計法の適用と検証について述べる。表 1 に検討対象とした床スラブの概要を示す。4 階建鉄骨造事務所の 3 階床スラブ(合成デッキによるデッキスラブ)である。X 方向 7.2m、Y 方向 13.7m、階高は 3.8m である。

設計では、はじめに通常の長期荷重に対する許容応力度設計により仮定断面を設定した。次に有限要素法によるプログラム  $\eta$  により固有値解析を実施し、2 章に示した信頼性設計法を適用し評価点 1 での信頼性指標  $\beta$  を求めた。 $\beta$  の目標値は  $\beta \approx 1$  とした。これにより 1 人歩行時のスラブ中央での応答加速度の使用限界状態(不快に感じる加速度)の超過確率 10%の値が V-70 程度になると考えられる。

固有値解析モデルは外壁側を除き、対象とするスラブの周辺 1 スパンを、柱は上下階のそれぞれ高さ 1/2 点までをモデル化し、柱の境界条件はピン支持とした。 $\beta$  が目標値に近づくように大梁、小梁、床スラブなど部材断面を修正し、表 1 に示す部材とした。この部材断面での固有値解析結果を図 2 に示す。1 次モードの固有振動数は 7.9Hz、評価点 1(床スラブ中央)での信頼性指標  $\beta$  は 0.99 となり、ほぼ目標値の 1 近くの値となった。

#### 3.2 振動実験による床スラブの振動特性の評価

建物建設後、躯体時(仕上げのない状態)において、振

表 1 検討対象とした床スラブの概要

用途	事務所	
床スラブ	デッキスラブ 75mm(デッキ)+80mm(コンクリート)	
柱	□-400×400×22	
大梁	H-500×200×10×16 (X 方向) H-700×300×13×24 (Y 方向)	
小梁	H-396×199×7×11	
階高	3.8m	
振動特性 (解析値)	1 <sup>st</sup> -mode	2 <sup>nd</sup> -mode
固有振動数	7.9Hz (0.1)	11.9Hz (0.2)
減衰定数	3.0% (0.5)	3.0% (0.5)
有効質量	15,200kg (0.05)	7,000kg (0.05)

( ) 内の値は予測誤差として設定した変動係数である。

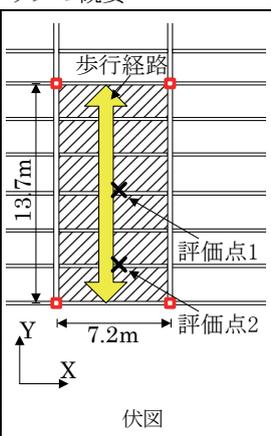


表 2 歩行実験内容

歩行人数	人数 × 回数	合計	歩行者全員の体重	
			平均(kg)	変動係数
1 人	10 × 10 (5 往復)	100	72.2	0.136

動実験(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。得られた振動モードを図 3 に示す。1 次モードの固有振動数は 7.7Hz、減衰定数は 5.0%であり、床スラブ中央がモードの腹になるモード形、2 次モードは 15.0Hz、3.0%であり、床スラブ内にモードの腹が 2 つ表れる形状であった。1 次モードの固有振動数は設計時の固有値解析結果とほぼ対応したが、2 次モードについてはやや高めであった。

#### 3.3 歩行実験による V 値の統計量の評価

##### (1) 歩行実験概要

歩行実験は床スラブ上において、人が歩行した状態で床スラブ上での応答加速度を計測するものである。歩行者は 10 人である。これを複数回実施することにより、V 値の統計量(平均値、変動係数、分布形状)を取得した。歩行実験の詳細は既報  $\eta$  に示している。

##### (2) 歩行実験方法

歩行実験内容を表 2 に示す。歩行者は 1 人とした。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 往復実施した。歩調は指定せず、自由とした。

加速度計は評価点 1 および 2 に設置し、鉛直方向加速度の時刻歴データを収録した。歩行実験で得られた加速度の時刻歴波形は、片道分のデータを 1 回として V 値を評価した。1 人あたり 5 往復、10 人で 100 個の V 値を取得した。

##### (3) 歩行実験から得られた V 値の統計的性質

図 4 に評価点 1, 2 における 1/3 オクターブバンド加速度ピークスペクトルを示す。どちらの図にも 100 回分のスペクトルを重ねがきしている。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

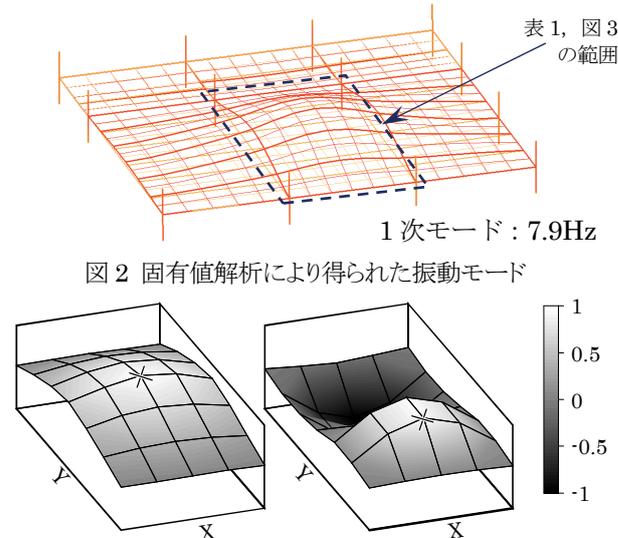


図 2 固有値解析により得られた振動モード

1 次モード(7.7Hz, 5.0%) 2 次モード(15.0Hz, 3.0%)  
注1) ( )内には固有振動数と減衰定数を示す  
注2) 振動モードは最大値を 1 に基準化している

図 3 ハンマリング試験により得られた振動モード

ク値を●で示している。評価点1においては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。評価点 2 においては中心周波数 8Hz のバンド帯よりも 16Hz のバンド帯が多くみられる。これは床の 2 次固有振動数成分(15Hz)と考えられる。どちらのバンド帯にもバラツキが見られる。

図 5 に評価点 1, 2 における非超過確率と V 値の関係を示す。図には、歩行実験から得られた 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、評価点 1, 2 ともに歩行実験から得られた V 値の非超過確率と確率分布関数は概ね対応しており、本実験もこれまで<sup>2),3)</sup>と同様に V 値の確率分布は対数正規分布とみなすことができる。なお、評価点 1 について確認すると、V 値の平均値の(11)式による計算値 1.54cm/s<sup>2</sup>(実験値 1.56cm/s<sup>2</sup>)、変動係数の(12)式による計算値 0.418(実験値 0.359)であり、概ね対応していた。

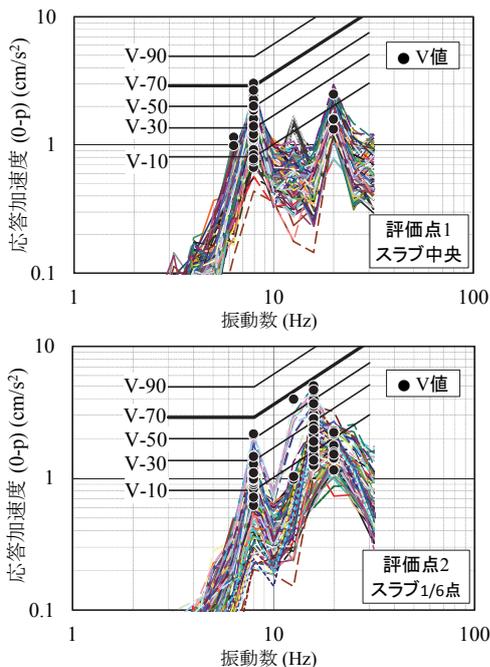


図 4 1/3 オクターブバンド加速度ピークスペクトル (1 人歩行時, 100 回分の重ねがき)

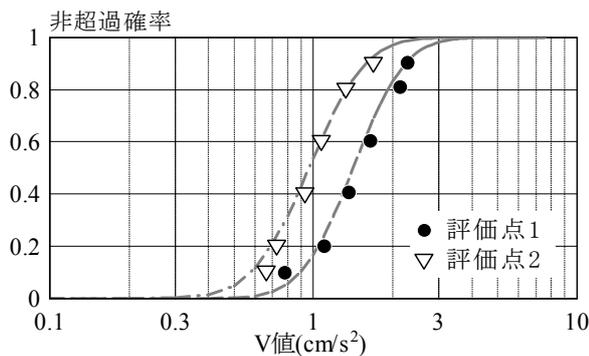


図 5 V 値の非超過確率

### 3.4 実験結果に基づく信頼性指標βの算定

次に、振動実験、歩行実験から信頼性指標βを求める。歩行人数は 1 人とした。表 3 に信頼性指標βの算定条件を示す。①設計時は、表 1 に示す固有値解析による固有振動数、既往の研究<sup>1)</sup>に基づく減衰定数を用いて予測誤差を考慮する場合、②振動実験は、3.2 節に示すハンマリング試験により得られた固有振動数、減衰定数を用いる場合である。①、②ともに応答値の算定には歩行振動 V 値応答スペクトル<sup>3)</sup>((10)~(15)式)を用いた。③歩行実験は、3.3 節に示す歩行実験から得られた V 値の統計量に基づき求める場合である。

表 4 には、評価点 1, 2 における信頼性指標βと不快確率 P<sub>f</sub>を示す。評価点 1 は 1 次モードのみを用いて評価し、評価点 2 は 2 次モードまでを考慮している。評価点 2 の①設計時、②振動実験については、各次モードのβと P<sub>f</sub>をあわせて示している。

評価点 1 において信頼性指標βは、②振動実験と③歩行実験の値が一致しており、①設計時に比べてやや大きめである。つまり不快確率 P<sub>f</sub>は若干低下している。評価点 2 において信頼性指標βは、②振動実験と③歩行実験の値がほぼ対応しており、①設計時に対して大きめになっている。これらは、減衰定数が設計時の想定よりも大きかったこと、予測誤差考慮の有無などによると考えられる。評価点 2 については、2 次モードの固有振動数の解析値と実験値の差の影響も考えられる。

表 3 信頼性指標βの算定条件

	①設計時	②振動実験	③歩行実験
固有振動数	固有値解析 (表 1, 図 2) 予測誤差考慮	実験値 (3.2 節, 図 3)	—
減衰定数	既往の研究 <sup>1)</sup> により設定(表 1) 予測誤差考慮	実験値 (3.2 節, 図 3)	—
応答値 (V 値) の確率分布	歩行振動 V 値応答スペクトル <sup>3)</sup> により算定		歩行実験(3.3 節)に基づき設定

表 4 信頼性指標βと不快確率 P<sub>f</sub>

評価点	項目	①設計時	②振動実験	③歩行実験	
評価点 1	β	0.99	1.28	1.28	
	P <sub>f</sub>	16.2%	10.1%	10.1%	
評価点 2	β	1.29	1.95	1.72	
	P <sub>f</sub>	9.9%	2.5%	4.3%	
評価点 2 内訳	(1 次モード)	β <sub>1</sub>	1.92	2.47	—
	φ <sub>1j</sub> = 0.38	β <sub>1</sub>	2.7%	0.7%	—
		P <sub>f1</sub>	—	—	—
	(2 次モード)	β <sub>2</sub>	1.47	2.08	—
φ <sub>2j</sub> = 1.00	β <sub>2</sub>	7.1%	1.9%	—	
	P <sub>f2</sub>	—	—	—	

図 6 に 1 人歩行時における評価点 1 での、V 値と使用限界状態(中央値  $4\text{cm/s}^2$ (=知覚の中央値  $2\text{cm/s}^2$  の 2 倍)、変動係数 0.8 の対数正規分布<sup>6)</sup>)の確率密度分布の比較を示す。応答値の算定条件の違いにより、②振動実験の場合には応答値の確率密度分布が V 値の低い方に集まる傾向を示し、 $\beta$  が上昇したと考えられる。

図 7 には鉛直振動に関する居住性能評価曲線に、①設計時、②振動実験、③歩行実験における V 値をプロットした結果を示す。信頼性指標 $\beta$ と同様、設計時に想定した V 値(①)と実験結果に基づく V 値(②、③)がほぼ対応している。つまり、設計時に想定した超過確率 10%において V-70 程度となっている。

#### §4. まとめ

本研究では、歩行振動に関する信頼性設計法を提案し、実際の床スラブの設計に適用し、振動実験、歩行実験によりその妥当性を確認した。本研究で明らかとなったことを以下に示す。

- 1) 使用限界状態として振動を不快と感じる加速度を設定し、既報において提案した歩行振動 V 値応答スペクトルを用いて、1 質点系における人の歩行による床振動に関する信頼性設計法の定式化を示した。
- 2) 上記設計法において、歩行者の違いによるばらつき、床スラブの振動特性の予測誤差を考慮し、多自由度系に拡張した。
- 3) 人の歩行による床振動への信頼性設計法の適用例を示し、実建物での振動実験、歩行実験に基づき、その荷重効果側の評価式、それに基づき求められる信頼性指標 $\beta$ の妥当性を確認した。

#### 参考文献

- 1) 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、pp93-100、2011.3
- 2) 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、pp741-747、2013.10
- 3) 増田圭司、中山昌尚、小河利行：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、日本建築学会環境系論文集 第 80 巻 第 717 号、pp1029-1036、2015.11
- 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、2004
- 5) 塩谷清人：振動知覚のバラつきを考慮した建築物の

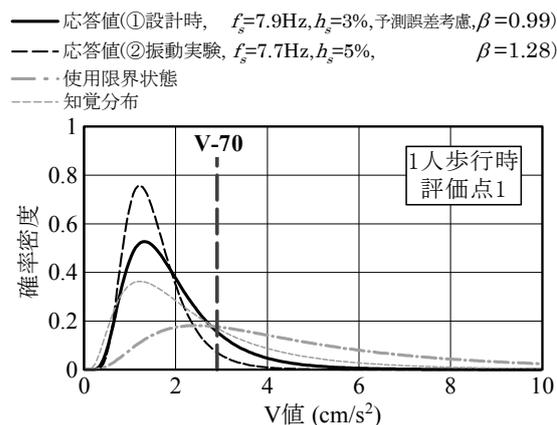


図 6 V 値と使用限界状態の確率密度分布

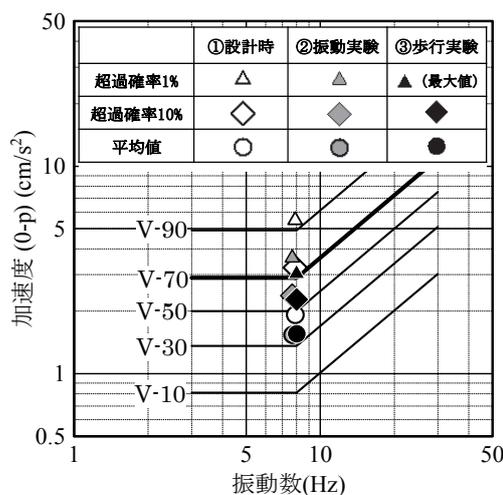


図 7 鉛直振動に関する性能評価曲線<sup>4)</sup>と 1 人歩行時の応答加速度(評価点 1)

居住性能評価 - 信頼性指標 $\beta$ による居住性能評価法の検討-、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-1、pp303-306、1999.8

- 6) 野田千津子、石川孝重：知覚確率と心理評価に基づいた環境振動に対する性能評価とその説明資料、日本建築学会関東支部研究報告集(環境工学)、pp691-694、2004.3
- 7) Takeshi Nakazawa, Keiji Masuda, and Takahiro Kondoh: Development of Floor Vibration Analysis System using a Finite Element Analysis called "Yurayzer3", IABSE CONFERENCE NARA 2015, pp298-299, 2015.5

#### ひとこと

近年、大スパン構造は事務所、物流から、医療福祉分野へと広がり、構造部材が居住性で決まる場合がちらほら。でもどうやって決めればいいんだ～！ そんな悲鳴が聞こえてきます。悩める設計者の一助になれば幸いです。



増田 圭司