多質点系モデルによる固体音領域の建物内振動伝搬特性の評価

THE EVALUATION OF THE VIBRATION PROPAGATION CHARACTERISTICS IN THE BUILDING OF THE STRUCTURE BORNE SOUND DOMAIN BY THE MULTI DEGREE OF FREEDOM SYSTEM

山岸 邦彰*, 野路 利幸**, 岩本 毅***, 原田 浩之****

*Kuniaki YAMAGISHI, Toshiyuki NOJI, Takeshi IWAMOTO
and Hiroyuki HARADA*

To obtain the basic characteristics of the vibration in the building many vibration measurements were carried out to devise a simple prediction method of the structure borne sound. In this paper, vibration measurements of the three buildings were carried out to construct the analysis model to predict how vibration input into the foundation amplifies it in each floor of the building, and a multi-degree-of-freedom system to simulate these measurement results were proposed. In addition, although some measures method for the structure borne sound was devised and it has been in use, the Tuned Mass Damper (TMD) which used the vibration of balconies and corridors as an idea of structure borne sound reduction tuned in the desired frequency were devised, and the effect were confirmed by the simulation using the proposed analysis model.

Keywords : *Multi-Degree-of-Freedom System, Vibration Measurement, Vibration Propagation, Structure Borne Sound
Transfer Function, Tuned Mass Damper*

多質点系モデル, 振動測定, 振動伝播, 固体伝搬音, 伝達関数, 同調質量ダンパー

1. はじめに

バブル経済崩壊以降の地価の大幅な下落, 工場跡地の遊休地の増大等を背景として, 都市の中心市街地に集合住宅が建設されるケースが多くなってきている。中心市街地には敷地に隣接して高度な交通網が発達しており, 交通に伴う騒音・振動が集合住宅の居住性に影響を与える可能性が高い。中でも地下鉄の通過にともない発生する固体伝搬音(以下, 固体音)は, 竣工後に問題となる場合が多く, また事後対策が困難なことから, 建築の企画・設計段階での精度の高い予測および対策立案が重要となる。

これまでに固体音予測に関する研究がいくつか行われている。松田ほか¹⁾は, 建物内の固体音の幾何学的拡散による減衰と内部粘性による減衰から構成された予測式を提案している。また, 要素間のエネルギーの平衡状態を解析して音圧レベルを推定する SEA 法²⁾や減衰が大きい場合にも適用できる拡張 SEA 法³⁾等が提案されている。これらの方法は対象建物が複雑な構造でも対応できる利点がある。しかし, 建物内で発生する振動の重複反射を現象的に捉えたものではないため, 振動モードの影響が強く現れる低振動数領域での適用には注意する必要がある。一方, 建物内の上下振動の重複反射を評価できる方法に縄岡ら⁴⁾の方法がある。この方法は柱をバネ, 床を質点とする多

質点系モデルにより柱の振動性状を算定し, その結果を用いてスラブ振動を有限要素法(以下, FEM)で解き, 室内の音圧レベルを予測する方法である。実測値との整合性は高いが, 解析の一部に FEM を利用する等, 方法が簡易であるとまではいえない。建築企画段階では評価に関わる時間が制限されていることが多く, 評価方法の簡易性も重要な要件と考えている。

筆者らは固体音の簡易予測法の構築を目的として, 建物内の振動伝搬特性を把握するための振動測定や解析を行い, 基礎資料の蓄積を行ってきた(例えば^{5), 6), 7)}。これらの結果, 数 10Hz~100Hz 程度の振動数範囲(以下, 固体音領域)における建物内の振動伝搬特性を精度良く予測するためには, 柱・壁等の鉛直部材の振動特性に加えて, 住戸内のスラブやバルコニー等の振動特性を反映させることが重要であり, 振動論に基づく評価方法の確立が必要であると考えている。

本論では, 多質点系モデルを利用した建物内振動伝搬特性の簡易評価方法の構築を目指す。はじめにスラブ等の上下振動を考慮した多質点系モデルによる解析方法を展開する。次に, 3 棟の建物に対して行った振動測定の概要および結果について示し, これらの実測結果から算定される Fourier スペクトル比と, 提示した評価法による伝達関数との比較を行い, 本評価方法の妥当性と問題点を明らかにする。

* 三井住友建設(株)建築事業企画部 修士(工学)

** 福井工業大学工学部建設工学科建築学専攻 教授・工博

*** 三井住友建設(株)研究開発管理部 工修

**** 三井住友建設(株)建築研究開発部 博士(工学)

Building Construction Marketing Planning Dept., Sumitomo Mitsui Construction Co., Ltd., M. Eng.

Prof., Dept. of Architecture and Civil Engineering, Fukui University of Technology, Dr. Eng. Research & Development Administration Dept., Sumitomo Mitsui Construction Co., Ltd., M. Eng.

Building Construction Research & Development Dept., Sumitomo Mitsui Construction Co., Ltd., Dr. Eng.

一方、予測した結果、固体音による居住環境の悪化が懸念される場合には適切な対策を講じる必要がある。これまでに固体音を低減するための対策が種々考案され、実用化されてきているが、本論ではバルコニーや廊下等を同調質量ダンパー（以下、TMD）として利用する固体音対策を検討する。ここでは、提示した評価法を用いて、質量比およびTMDの振動数をパラメータとして解析を行い、その効果について論じる。

2. 多質点系モデルを用いた上部構造の伝達関数の評価方法

これまで行ってきた振動測定およびその数値シミュレーションの結果から、上部構造の上下方向の伝達特性は各階質量と鉛直支持部材の鉛直剛性から求まる固有モードの影響を受けるだけでなく、上下振動が支配的なスラブ、バルコニーおよび廊下等（以下ではまとめてスラブと呼ぶ）の振動の影響も強く受けていることが分かった。本章では、多質点系モデルを用いて、このようなスラブの振動特性を考慮に入れた上部構造の伝達関数の評価方法を示す。ここでいう上部構造の伝達関数とは、建物の柱際または壁際位置における最下階に対する各階の絶対加速度の Fourier 振幅比をいう。対象とする振動成分は固体音の発生に対して影響の大きい上下成分とする。

評価方法のフローを図1に示す。以下ではこのフローの各項目の詳細について示す。

図1 評価方法のフロー

2.1 上下振動部材の固有振動数および有効質量比の計算

居住部のスラブ（周辺梁を含む）や廊下等のように上下振動が支配的な部材をここでは上下振動部材と呼ぶことにする。柱および壁等の鉛直支持部材は含まない。上下振動部材としてはこの他に、二重床や天井、キッチンカウンター等建築躯体ではない部位もあるが、ここでは比較的荷重の大きいスラブのみを対象とする。

一般に、スラブの固有振動数および有効質量比を精度よく計算するためには、スラブの形状、スラブ厚、大梁・小梁、荷重等の諸条件を詳細に考慮できる FEM 等による評価が有効であるが、計算時間やスキルの問題から汎用性があるとは言えない。また、固体音予測が求められる事業企画段階では、詳細な設計情報がないこと、評価に多くの時間を費やせないこと、等の制約がある。そこで、スラブの形状を単純化した矩形の梁付きスラブとして扱うことが現実的である。矩形の梁付きスラブの固有振動数の計算方法は、高畠ら^{8),9),10)}によって示されている。本論では、固有振動数の算定に同法を用いる。

スラブ振動に対する減衰の影響は小さいと考え、振動方程式における減衰項を無視すると、スラブの自由振動の振動方程式は式(1)のように示される。

$$m_0 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + D_0 \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} \right) = 0 \quad (1)$$

ここで、 m_0 は単位面積当たりのスラブの質量、 w はたわみを表す。 D_0 はスラブの曲げ剛性であり、 E を Young 率、 h_0 をスラブ厚さ、 ν を Poisson 比とすると、 D_0 は式(2)で表現される。

$$D_0 = \frac{E h_0^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2)$$

たわみ w は、空間項と時間項とに変数分離し、さらに空間項を級数展開して式(3)のように表現される。

$$w(x, y, t) = \left[\sum_m \sum_n w_{mn} f_{mn}(x, y) \right] e^{i\omega t} \quad (3)$$

ここに w_{mn} は係数、 $f_{mn}(x, y)$ は、 x 方向 m 次、 y 方向 n 次（以下、 mn 次）の形状関数であり、近似的に式(4)で表現される。

$$f_{mn}(x, y) = f_m(x) f_n(y) \quad (4)$$

ここで、 $f_m(x), f_n(y)$ はそれぞれ式(5), (6)で表現される。

$$f_m(x) = q_{1m}(\cos k_m x + \cosh k_m x) + q_{2m}(\cos k_m x - \cosh k_m x) + q_{3m}(\sin k_m x + \sinh k_m x) + q_{4m}(\sin k_m x - \sinh k_m x) \quad (5)$$

$$f_n(y) = q_{1n}(\cos k_n y + \cosh k_n y) + q_{2n}(\cos k_n y - \cosh k_n y) + q_{3n}(\sin k_n y + \sinh k_n y) + q_{4n}(\sin k_n y - \sinh k_n y) \quad (6)$$

ここに、 q_{1m}, q_{1n} 等は周辺梁の境界条件により求まる係数である。式(3)を式(1)に代入すると Galerkin 式(7)が得られる。

$$\delta w_{mn} : \sum_m \sum_n w_{mn} [A_{mnmn} - \lambda^2 B_{mnmn}] = 0 \quad (7)$$

ここで、 ω_{mn} をスラブの mn 次固有角振動数とすると、 A_{mnmn}, B_{mnmn} 、 λ_{mn}^2 はそれぞれ式(8)~(10)で表される。

$$A_{mnmn} = \int_0^{l_x} \int_0^{l_y} \left(\frac{\partial^4 f_{mn}}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 f_{mn}}{\partial y^4} + 2 \frac{\partial^4 f_{mn}}{\partial x^2 \partial y^2} \right) f_{mn} dx dy \quad (8)$$

$$B_{mnmn} = \int_0^{l_x} \int_0^{l_y} f_{mn} f_{mn} dx dy \quad (9)$$

$$\lambda_{mn}^2 = \frac{\omega_{mn}^2 m_0}{D_0} \quad (10)$$

式(7)中の $A_{mnmn} - \lambda^2 B_{mnmn}$ が 0 となるように収束演算を行うと、スラブの固有角振動数 ω_{mn} が求まり、固有モードは近似的に f_{mn} で表現される。

以上の解法により、任意の建物の一般階 i 階において第 k スラブの mn 次モードの有効質量比（ k スラブの全質量に対する有効質量の比） Rem_{ikmn} は、式(11)より求められる。

$$Rem_{ikmn} = \frac{\left\{ \int_0^{l_{ix}} \int_0^{l_{iy}} f_{ikmn}(x, y) dx dy \right\}^2}{l_{ikx} l_{iky} \int_0^{l_{ix}} \int_0^{l_{iy}} \{f_{ikmn}(x, y)\}^2 dx dy} \quad (11)$$

ここに、 l_{ikx}, l_{iky} はそれぞれ i 階 k スラブの x, y 方向長さ、 $f_{ikmn}(x, y)$ は i 階 k スラブの mn 次形状関数を表す。本論では、 i 階の k スラブの mn 次モードの固有角振動数 ω_{ikmn} と有効質量比 Rem_{ikmn} は解析対象振動数の範囲、すなわち固体音が問題となる 100Hz（628 rad/s）までを対象とする。また、少なくともスラブの 1 方向が偶数次モードとなる場

合については、有効質量比がほぼ 0 となるので、有効質量比 Rem_{ikmn} を無視することにする。

2.2 上下振動部材の等価鉛直剛性の算出

以上で求めた i 階 k スラブ mn 次モードの固有角振動数 ω_{ikmn} と有効質量比 Rem_{ikmn} を用いて、パネマスによる多質点系モデルを構築する。 i 階 k スラブの全質量を Ms_{ik} とすると、 i 階 k スラブ mn 次モードの等価鉛直剛性 ks_{ikmn} は式(12)で表現することができる。

$$ks_{ikmn} = Ms_{ik} \cdot Rem_{ikmn} \cdot \omega_{ikmn}^2 \quad (12)$$

2.3 各階の質量および鉛直剛性の計算

図 2 に示すような断面を考える場合には、建物の一般的な地震応答解析におけるモデル化の方法と同様に、各階床に集中質点を設定する。集中質点の質量 m_i は、各階の階高の中心間で囲まれた部分の躯体およびその他の部位の全質量 m_{alli} 、2.1 節で計算される有効質量比 Rem_{ikmn} を利用して式(13)により算定される。

$$m_i = m_{alli} - \sum_k Ms_{ik} - \sum_m \sum_n \sum_{N_{ikn}} Rem_{ikmn} \quad (13)$$

$$m = \{1, 3, 5, \dots\}, \quad n = \{1, 3, 5, \dots\}$$

ここに、 N_{Si} は i 階の計算対象とするスラブ総数、 N_{ikm} および N_{ikn} は k スラブの x および y 方向の計算対象とすべき最高次モード次数である。なお、前述の理由から m, n は奇数であり、以降に示す数式においても同様とする。 i 階、 $i-1$ 階間の鉛直剛性 $kv_{i,i-1}$ は、階高 H_i 、鉛直支持部材の断面積 A_i および部材の Young 率 E_i から式(14)で計算される。

$$kv_{i,i-1} = \frac{E_i A_i}{H_i} \quad (14)$$

図 2 集中質点および鉛直剛性の計算方法

2.4 多質点系モデルの構築

図 3 に多質点系モデルの一般階におけるモデル図を示す。ここでは最下階床に対する上層階床の伝達関数を評価するために、最下階床を固定としたモデルとする。 i 階の集中質点（質量 m_i ）に対して、2.1 項および2.2 項で算定された各スラブの各次等価鉛直ばねを介して対応する各次等価質量が接続されている。図 3 より、質点 i における力の釣合い式は式(15)となる。

$$m_i \ddot{y}_i + \sum_j c_{ij} \dot{y}_j + \sum_k \sum_m \sum_n \sum_{N_{ikm}} (\dot{y}_i - \dot{y}_{ikmn}) c_{iikmn} + (y_i - y_{i-1}) kv_{i,i-1} + (y_i - y_{i+1}) kv_{i+1,i} + \sum_k \sum_m \sum_n \sum_{N_{ikm}} (y_i - y_{ikmn}) ks_{ikmn} = -m_i \ddot{x}_0 \quad (15)$$

ここに、 y_i, y_{ikmn} は質点 i および $ikmn$ の相対変位、変数上部のドット・は時間に関する 1 階微分、 $\ddot{\cdot}$ は同 2 階微分、 $\ddot{x}_0$ は最下階の絶対加速度、他の変数については図 3 を参照されたい。

図 3 多質点系モデルの一般階におけるモデル図

また、質点 $ikmn$ における力の釣合い式は式(16)となる。なお、質点系に置換されたスラブを以下ではスラブ振動系と呼ぶ。

$$m_{ikmn} \ddot{y}_{ikmn} + (\dot{y}_{ikmn} - \dot{y}_i) c_{iikmn} + (y_{ikmn} - y_i) ks_{ikmn} = -m_{ikmn} \ddot{x}_0 \quad (16)$$

相対変位 y_i, y_{ikmn} および最下階絶対加速度 $\ddot{x}_0$ の Fourier 変換表示を Y_i, Y_{ikmn} および $\ddot{X}_0$ すると、式(15),(16)はそれぞれ式(17),(18)となる。

$$-m_i \omega^2 Y_i + i\omega \left\{ \sum_j \left(c_{ij} + \delta_{ij} \sum_k \sum_m \sum_n \sum_{N_{ikm}} c_{iikmn} \right) Y_j \right\} + \left(kv_{i,i-1} + kv_{i+1,i} + \sum_k \sum_m \sum_n \sum_{N_{ikm}} ks_{ikmn} \right) Y_i - (kv_{i,i-1} Y_{i-1} + kv_{i+1,i} Y_{i+1}) \quad (17)$$

$$- \sum_k \sum_m \sum_n \sum_{N_{ikm}} (ks_{ikmn} + i\omega c_{iikmn}) Y_{ikmn} = -m_i \ddot{X}_0$$

$$-m_{ikmn} \omega^2 Y_{ikmn} + i\omega (Y_{ikmn} - Y_i) c_{iikmn} + (Y_{ikmn} - Y_i) ks_{ikmn} = -m_{ikmn} \ddot{X}_0 \quad (18)$$

ここに、 δ_{ij} は Kronecker のデルタである。

式(18)から Y_{ikmn} は式(19)のように求められる。

$$Y_{ikmn} = \frac{(ks_{ikmn} + i\omega c_{iikmn}) Y_i - m_{ikmn} \ddot{X}_0}{-m_{ikmn} \omega^2 + i\omega c_{iikmn} + ks_{ikmn}} \quad (19)$$

式(19)を式(17)へ代入すると、式(17)は各階質点 i の相対変位 $Y_i (i=1, 2, \dots, N)$ のみで表現される。すなわち、仮に各階のスラブ数と計算対象モード次数を同一とすると全質点数は $N \times N_{Si} \times N_{ikm} \times N_{ikn}$ ($=N N_{Si} N_{ikm} N_{ikn}$) となり、一般的には $N N_{Si} N_{ikm} N_{ikn} \times N N_{Si} N_{ikm} N_{ikn}$ のマトリクスを計算する必要があるが、式(17)を利用すると、 $N \times N$ のマトリクス計算で済むため計算時間を大幅に短縮することができる。

式(17)をマトリクスで表現すると式(20)となる。

$$(-\omega^2 \mathbf{M} + i\omega \mathbf{C} + \mathbf{K}) \mathbf{Y} = \mathbf{B} \ddot{X}_0 \quad (20)$$

ここに、

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & m_N \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{11} + \sum_k \sum_m \sum_n \sum_{N_{1km}} c_{11kmn} & \dots & c_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{N1} & \dots & c_{NN} + \sum_k \sum_m \sum_n \sum_{N_{Nkm}} c_{NNkmn} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} kv_1 + \sum_k \sum_m \sum_n^{Nq} ks_{ikmn} - \sum_k \sum_m \sum_n^{Nq} \sum_n^{Nq} \frac{ks_{ikmn}^2}{Q_{ikmn}} - kv_1 & 0 & \dots & 0 \\ -kv_1 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & -kv_{N-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & -kv_{N-1} + kv_N + \sum_k \sum_m \sum_n^{Nq} ks_{ikmn} - \sum_k \sum_m \sum_n^{Nq} \sum_n^{Nq} \frac{ks_{ikmn}^2}{Q_{ikmn}} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\text{ここに, } Q_{ikmn} = -m_{ikmn}\omega^2 + i\omega c_{ikmn} + ks_{ikmn} \quad (24)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -m_1 - \sum_k \sum_m \sum_n^{Nq} \frac{m_{1kml} ks_{ikmn}}{Q_{ikmn}} \\ -m_2 - \sum_k \sum_m \sum_n^{Nq} \frac{m_{2kml} ks_{ikmn}}{Q_{ikmn}} \\ \vdots \\ -m_N - \sum_k \sum_m \sum_n^{Nq} \frac{m_{Nkml} ks_{ikmn}}{Q_{ikmn}} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\mathbf{Y}^T = \{Y_1 \quad Y_2 \quad \dots \quad Y_N\} \quad (26)$$

また、減衰マトリクス $\mathbf{C}$ の要素は、式(27)と式(28)の合成による。ここで式(27)は上下振動部材を除く上部構造系の減衰係数 c_{ij} で、比例減衰系と仮定した非減衰固有ベクトルおよび各次モード減衰定数をもとに算定される¹¹⁾。式(28)は i 階 k スラブ mn 次モードの減衰係数 c_{ikmn} で、減衰マトリクスの対角項に対してのみ与えられることになる。

$$c_{ij} = \sum_{p=1}^N \frac{2_p h_p \omega_p m_i m_j u_i u_j}{p M} \quad (27)$$

$$c_{ikmn} = 2h_{ikmn}\omega_{ikmn}m_{ikmn} \quad (28)$$

ここに、 h_{ikmn} および ω_{ikmn} は i 階 k スラブの mn 次モードの減衰定数および固有角振動数、 ${}_p h_p$, ${}_p \omega$ はスラブ振動系を除いた上部構造系の p 次モード減衰定数および p 次固有角振動数、 ${}_p u_i$, ${}_p u_j$ はそれぞれ p 次固有ベクトルの i, j 階の値、 ${}_p M$ は p 次的一般化質量である。

式(20)から各階の相対変位ベクトル $\mathbf{Y}$ は式(29)で求められる。

$$\mathbf{Y} = [-\omega^2 \mathbf{M} + i\omega \mathbf{C} + \mathbf{K}]^{-1} \mathbf{B} \ddot{\mathbf{X}}_0 \quad (29)$$

2.5 伝達関数の計算

式(29)から求まる各階の相対変位 Y_i と最下階の絶対加速度 $\ddot{\mathbf{X}}_0$ から、 i 階の上部構造の伝達関数 T_i は式(30)で表現される。

$$T_i = \frac{-\omega^2 Y_i + \ddot{\mathbf{X}}_0}{\ddot{\mathbf{X}}_0} \quad (30)$$

また、最下階絶対加速度 $\ddot{\mathbf{X}}_0$ を 1 に基準化し、伝達関数 T_i を絶対値で表現すると、伝達関数の絶対値は最終的に式(31)となる。

$$T_i = |-\omega^2 Y_i + 1| \quad (31)$$

3. 実測結果による評価方法の検証

3.1 振動測定概要

式(31)から得られる上部構造の伝達関数を、高・中・低層の3建物の振動測定結果のシミュレーションに適用し、妥当性を検証する。表1に測定を行った3建物の概要を示す。

図4に建物Aおよび建物Bと地下鉄函体との位置関係、およびピックアップの配置を示す。建物Aの基礎下端から3.3m深さの位置に、また建物Bから0.9m離れた場所に地下鉄の函体がある。

建物Aは平面が約10m×8.3mのL字形をした4階建の低層集合住

表1 測定した3建物の概要

	建物A	建物B	建物C ^{※1}
対象軌道	地下鉄軌道	地下鉄軌道	高架軌道
軌道と基礎との水平距離	0.0 m	0.9 m	8.0 m
用途	集合住宅	集合住宅	事務所
階数	地上4階	地上14階	地上8階 地下2階
構造種別	RC造	RC造	SRC造
構造形式	壁式	壁付ラーメン	壁付ラーメン
基礎形式	直接基礎	杭基礎 (杭長20 m)	直接基礎
基礎底位置	GL-1.7 m	GL-2.7 m	GL-6.4 m
基礎梁成	1.6 m	2.8 m	不明

※1: 数値は測定時に行った実測等による推定値

図4 建物A,Bと地下鉄に関する概要図

宅である。構造種別は鉄筋コンクリート造 (RC 造)、構造形式は壁式、基礎は直接基礎である。本建物は固体音対策として基礎直下に厚さ50mmの防振用のゴムシートを全面に敷いている。測定当時は上棟直後であり、各室には仕上げ・設備等が設置されていない状況であった。建物Aは基礎梁を介して建物Bと繋がっている。測定には周波数範囲がDC~100Hzの1成分サーボ型加速度計 (IMV(株)製) を使用した。ピックアップは各階に配置し、スラブ振動の影響の少ない壁の入隅部に設置した。データはサンプリング周波数1kHz、A/D変換は16 bitで収録した。また、データ処理は地下鉄の通過時間約10~15秒間を含めた約16秒間でFourierスペクトル(バンド幅0.5HzのParzenウィンドウによる平滑処理を実施)を計算し、各点間のスペクトル比を計算した後、良好な測定結果が得られたものに対してのみ相平均した。

建物Bは14階建の高層集合住宅で、約11.6m×19.0mのほぼ整形な平面形状をなしている。構造種別はRC造、構造形式はラーメン、基礎は杭基礎(支持杭)である。建物Bも固体音対策として基礎直下に厚さ50mmの防振用の発泡プラスチック系シートを全面に敷いている。振動測定は竣工直前の状況で実施した。測定には周波数範囲がDC~100 Hzの1成分加速度計(株ミツトヨ製)を使用した。ピックアップは一般階ではスラブ振動の影響の少ない柱際、屋上階では柱直上の屋根

仕上げ面上に設置した。データ処理についてはサンプリング周波数を 500Hz とした以外は建物 A の処理条件と同一である。

図 5 に建物 C と地下鉄函体との位置関係およびピックアップの配置図を示す。なお、建物と地下鉄に関する図面を入手することができなかったため、図中の寸法は実測等による推定値である。建物 C の内部には地下鉄の出入り口があり、約 8.0m 離れた場所に地下鉄函体がある。建物 C は約 16m×10m のほぼ長方形をした 8 階建の中層事務所建築である。構造種別は SRC 造（非充腹）であり、基礎形式は未確認であるが基礎深度・地盤状況から直接基礎と推定される。測定時には天井等の仕上げ材は存在していたが、什器・備品等がない状況であった。また、対象建物は測定後間もなく解体され、現在は存在しない。測定システムおよびデータ処理は建物 A と同一である。

図 5 建物 C と地下鉄に関する概要図

3.2 実測と解析による伝達関数の比較

上部構造の伝達関数は、実測では Fourier スペクトル比（以下、スペクトル比）の計算により、解析では表 2 に示す諸元を用いた多質点系モデルから式(31)により計算する。以下、解析モデルの構築方法について概説する。

Young 率 E_i は鉄筋コンクリート構造計算規準¹²⁾によって求めたコンクリートの Young 率に静弾性係数に対する動弾性係数の比¹³⁾として 1.3 を乗じたものと、鋼材の Young 率 $2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ とをそれぞれの部材断面積で重み付き平均した値とする。スラブ振動系のモデル化は、固有振動数が 100Hz 以下で、各階全質量に対する当該スラブの mn 次モード有効質量比が 100 分の 1 以上のスラブのみ考慮した。減衰定数 h_{ikmn} については、実測による応答倍率 a^7 を用いて $1/2a$ により減衰定数を評価すると約 0.03 であったことから、全てのスラブ振動系に対して一律に $h_{ikmn}=0.03$ とした。各質点の質量 m_i は図 2 に示す当該体積にコンクリートの単位体積質量 $\gamma=2.4 \text{ t/m}^3$ （SRC 造の建物 C は $\gamma=2.6 \text{ t/m}^3$ ）を乗じたものとし（建物 B、C では仕上げ質量を 0.1 t/m^2 と仮定して加算）、各層の鉛直剛性 $k_{v,i-1}$ は雑壁等を無視した柱および壁のみの水平断面積 A_i から式(14)より計算した。スラブ振動系を除く全体系の減衰定数は、これまでの測定結果のシミュレーション等から上下方向 1 次モードに対する減衰定数 h_1 が 0.07 程度であったこと、高次モードになるに従い減衰定数がやや大きくなると考えられることを考慮して、1 次から 4 次までの減衰定数 ($h_1 \sim h_4$) をそれぞれ 0.075、

0.10、0.125、0.150 とし、5 次以上の減衰定数を 0.175 で一定とした。

表 2 多質点系モデル構築のための主な条件

	建物 A	建物 B	建物 C ^{※1}
コンクリート設計基準強度 F_c (N/mm ²)	33	33	13.5
Young 率 (N/mm ²)	37.9×10^3	37.9×10^3	31.0×10^3
代表断面		950×600	550×550
柱 (mm)			
壁厚 (mm)	200	180	150
スラブ厚 (mm)	200	200	150
各階質量の代表値 (t)	73.5	192	185
各階剛性の代表値 (kN/cm)	743.7	1,210	620.4
スラブ振動系の総数	3	3	4
スラブ振動系有効質量 (t)			
No.1	6.72	26.4	32.2
No.2	4.43	9.38	10.1
No.3	0.894	3.69	3.09
No.4	—	—	2.44
スラブ振動系固有振動数 (Hz)			
No.1	39.0	41.3	10.6
No.2	65.7	58.1	17.9
No.3	89.4	77.6	32.7
No.4	—	—	53.1
減衰定数	スラブ振動系を除く全体系	$h_1=0.075, h_2=0.100, h_3=0.125, h_4=0.150, h_5 \sim 0.175$	
	スラブ振動系	0.03	
モデル化に当たっての特記事項	スラブ振動系固有振動数は、周辺固定および単純支持の各条件で計算された振動数の平均値とした。	同形状のスラブをまとめ、3 種類のスラブ振動系を設置した。	2 階の塔屋が存在するが、この部分の振動系を考慮せず、当該質量を屋上階の質量に加算している。

※1：数値は測定時に行った実測等による推定値

図 6 に建物 A における上部構造の伝達関数を実測結果と解析結果とを比較して示す。また、比較のためスラブ質点系を設置していない場合の伝達関数も示す。なお、実測では屋上階にピックアップを設置していないため、1 階に対する屋上階の伝達関数の実測値は示していない。実測に見られる約 55Hz の顕著なピークは解析でも認められる。解析のピークは多質点系モデルの 1 次モードであることから、実測結果に見られる約 55Hz のピークは建物の上下方向の 1 次モード振動数であると推定される。また、実測結果に見られる 37、73Hz 付近のやや小さなピークは、スラブ質点系を接続したモデルでは再現されるが、スラブ質点系を接続していない場合の解析では再現されない。これは、39.0Hz と 65.7Hz に固有振動数を有するスラブ振動系の影響を受けて、これらの振動数において伝達関数が落ち込み、逆にこれらの振動数の前後で伝達関数にピークが生じたものと考えられる。すなわち、スラブ振動系が TMD としての挙動をしたため、それらの固有振動数付近で伝達関数が低下していることが分かる。また、各階質点には 89.4Hz に固有振動数を有するスラブ質点系も接続されているが、有効質量が小さいためこの系による伝達関数の低減効果は軽微である。さらに、実測と解析のピーク振幅はほぼ整合しており、設定した 1 次モード減衰定数 $h_1=0.075$ が概ね妥当であることが確認される。

図 7 に建物 B における上部構造の伝達関数を実測結果と解析結果とを比較して示す。両者を比較すると約 12Hz の 1 次ピーク振動数および約 33 Hz 付近の振幅の小さい 2 次ピークはほぼ一致している。しかし、これ以上の高振動数領域における伝達率は、解析値は実測値を下回っており、必ずしもよく対応しているとはいえない。また、最上階を除くと実測が概ね 1～2 となっているのに対して解析は 1 以下となり、実測が解析をかなり上回っている。また、伝達率は異なるものの最上階を除く両者の伝達率は、凹凸はあるが上層階になるにしたがい一定の減少傾向が見られる。

(a) 1 階に対する屋上階の上部構造伝達関数

(b) 1 階に対する 4 階の上部構造伝達関数

(c) 1 階に対する 3 階の上部構造伝達関数

(d) 1 階に対する 2 階の上部構造伝達関数

図 6 建物 A の上部構造の伝達関数の実測値と解析値との比較

このことは、建物 B のような条件の場合、松田らの予測式における内部粘性項の仮定が有意であると思われる。なお、図には示していないが、解析から求まる伝達率が実測より小さいことから、本設定より小さなモード減衰定数を設定して伝達関数を計算した。その結果、各次モード振動数のピーク値が大きくなるだけで、明確なピークの見られない実測結果に示されるような伝達関数の傾向は見られなかった。

以上から、高層建物である建物 B の多質点系モデルによる評価は、約 30 数 Hz 以上の振動数領域で実測値と整合しないことが分かった。この理由として、建物 B には測定時に二重床や作り付けのキッチン、収納棚等が設置されており、これらが上下振動部材として上部構造の伝達関数に影響していると考えられる。ただし、実測結果から伝達率は最大でも 2 程度であり、建物内の伝達率はそれ程大きくないことも明らかになった。なお、最上階で高振動数領域の伝達率が大きくなった理由として、最上階の測定点が他点より柔らかい防水シート上であったことが原因であると推測される。

図 8 に建物 C における上部構造の伝達関数を実測結果と解析結果とを比較して示す。他の建物より全体的に伝達関数が小さいため、グラフの最大値を 1/2 に縮小して示す。実測結果に見られる 30Hz 以下の伝達関数の凹凸は解析結果でも概ね再現され、比較的整合している。しかしながら、30Hz 以上の振動数領域では、35Hz 付近や 50Hz 付近に見られるピークを解析では再現していない。

(a) 1 階に対する屋上階の上部構造伝達関数

(b) 1 階に対する 13 階の上部構造伝達関数

(c) 1 階に対する 10 階の上部構造伝達関数

(d) 1 階に対する 7 階の上部構造伝達関数

(e) 1 階に対する 4 階の上部構造伝達関数

図 7 建物 B の上部構造の伝達関数の実測値と解析値との比較

これは、建物 C の寸法・材料定数の設定を推定断面で行っているモデル化誤差が主原因であると思われる。スラブ振動系が接続されていない場合の 1, 2 次モード振動数の解析結果はそれぞれ約 15, 43Hz であり、一般的に 2 次モード振動数が 1 次モード振動数に対して約 3 倍となっているのに対して、実測に見られる 2 次モード振動数は 35Hz 付近とかなり低い振動数になっている。このような現象は上部階に比較的剛性の低い振動系が存在することで再現することができる。建物 C の場合は、最上階に設置された塔屋部分のモデル化が重要であると考えられる。

また、建物 C は建物 B と異なり、実測結果において 50Hz 以上の高振動数領域では、凹凸はあるものの伝達率が概ね 1 以下と小さくなっている。仕上がらないことが建物 B との大きな違いであり、仕上の有無により高振動数領域の伝達率が変わってくるものと推定される。

図8 建物Cの上部構造の伝達関数の実測値と解析値との比較

以上の結果から、実測結果から得られる伝達関数にはスラブの上下振動部材の振動が大きく影響しており、多質点系モデルにより伝達関数を算定する場合にはこれらの上下振動部材を適切に評価することが重要である。3建物の解析結果では、低層建物である建物Aは100Hz程度までは実測結果と良好に一致したが、建物B,Cでは高振動数側で実測結果との整合性が取れていない。二重床等の仕上げや塔屋等、モデル化対象範囲の考え方およびそれらのモデル化が今後の課題である。また、本論では最下階床に対する各階床の伝達関数について検討したが、固体音を予測するためには建物A,Bに施工された防振シートの影響や基礎の入力損失効果を適切に評価する必要がある。

4. TMD 部材による伝達率低減効果に関する解析的検討

前章のシミュレーション解析結果から、上下振動部材の固有振動数付近で伝達率が低下することが分かった。換言すれば、上下振動部材がTMDとしての働きをしているとも言える。固体音低減対策として、

既に様々な方法が提案され実用に供されているが^{例えば14)}、上下振動部材をTMDとして働かせることにより伝達率を低減させることも有効な手段であると考えられる。本章では、低層建物である建物Aを対象として、各階でTMDとして働かせる上下振動部材（以下、TMD部材）の質量比とTMD部材の固有振動数（以下、TMD振動数）をパラメータとして解析を行い、その低減効果を確認する。なお、ここで想定しているTMD部材は、集合住宅の共用部である廊下およびバルコニー等であり、通常のTMDのように質量を付加することなくTMD効果を期待できることに意義がある。

表3にTMD部材のパラメータを示す。TMD部材の固有振動数を建物Aの上下方向の1次固有振動数である55Hzとし、TMD部材の有効質量比が当該階の全質量の0.010, 0.020, 0.050, 0.10のとなるように設定した（CASE1）。TMD部材は各階に設置するものとし、TMD部材の減衰定数を一律に $h_{TMD}=0.07$ とした。

図9にCASE1の解析結果を示す。TMD部材の有効質量比が大きくなるにしたがい、55Hz付近にあった伝達関数のピークの減少が顕著になり、TMDとしての効果が見られる。しかし、TMD部材を設置したことにより、37Hz付近と48Hz付近の伝達関数が僅かながら大きくなり、TMD部材の有効質量比が大きくなるほどその傾向が顕著である。そこで、TMD振動数をこれらのピーク振動数に相当する37, 48Hzに同調させたTMD部材を設置したモデルを構築する。表4に解析ケースおよび解析パラメータを示す。TMD振動数を48Hzと55Hzに設定した2つのTMD部材を設置した解析ケースをCASE2、さらにTMD振動数を37Hzに設定したTMD部材を設置した解析ケースをCASE3とする。各ケースのTMD部材の有効質量比の和はCASE1と同じ0.010, 0.020, 0.050, 0.10とした。CASE2はTMD振動数48Hzの有効質量比が、またCASE3はTMD振動数37, 48Hzの有効質量比の和が、TMD振動数55Hzの有効質量比に対してそれぞれ一律に1/2となるように設定した。

表3 TMD 部材の設定パラメータ(CASE1)

CASE 名	各階 TMD 部材数	TMD 部材 振動数(Hz)	TMD 部材の有効質量比			
			(a)	(b)	(c)	(d)
CASE1	1	55	0.010	0.020	0.050	0.10

図9 伝達関数(CASE1)

表 4 TMD 部材の設定パラメータ(CASE2,3)

CASE 名	各階 TMD 部材数	TMD 部材 振動数(Hz)	TMD 部材の有効質量比			
			(a)	(b)	(c)	(d)
CASE2	2	55	0.0067	0.013	0.033	0.067
		48	0.0033	0.067	0.017	0.033
CASE3	3	55	0.0050	0.010	0.025	0.050
		48	0.0025	0.0050	0.013	0.025
		37	0.0025	0.0050	0.013	0.025

図 10 伝達関数(CASE2)

図 11 伝達関数(CASE3)

図 10 に CASE2, 図 11 に CASE3 の解析結果を示す。CASE1 と比較して TMD 振動数が 55Hz の TMD 部材の有効質量比が相対的に小さくなったため、55Hz 付近の伝達関数の低減効果はやや小さくなるものの、37Hz と 48Hz 付近のピークが低減され、40~60Hz 付近の伝達率は全体的に小さくなっている。特に、CASE3 で各階の有効質量比が 0.10 の場合は、100Hz までの振動数領域で概ね伝達関数が 3 以下となっている。

以上より、適切な TMD 部材を設置することによる固体音領域での伝達関数の低減効果が確認された。有効質量比が高く、かつ固有振動

数を変化させ得る廊下やバルコニーの TMD 化が実現化すれば、固体音対策の一方法として有用である。さらに、TMD 部材の固有振動数を調整することができれば事後対策も可能になると考えられる。

5. まとめ

固体音領域における建物内の振動伝搬特性(上部構造の上下方向の伝達関数)の評価方法として、スラブ等の振動を考慮した多質点系モデルを利用した評価方法を提示し、3 建物の振動測定から得られた伝達関数と本評価法により得られる伝達関数との比較を行った。その結果、低層建物については実測と解析から求まる伝達関数が概ね整合し、中高層建物については低振動数領域でのピーク振動数は概ね一致した。これらのことから、上部構造の伝達関数を評価する場合に、スラブ等の上下振動部材の振動の影響を適切に考慮することが重要であることが分かった。ただし、中高層建物の高振動数領域では実測結果と解析結果との整合が取れなかった。この原因としては、本モデル化では上下振動部材としてスラブ等の躯体部分のみを考慮したが、モデル化していない二重床等の仕上げや塔屋の振動が影響していることが考えられる。中高層建物の高振動数領域における伝達関数の評価については次期の研究課題としたい。

また、スラブ等の上下振動部材には TMD としての効果があることから、低層建物を対象として TMD 部材を設置したときの伝達関数の低減効果についてパラメータスタディを行った。その結果、適切な TMD 振動数を設定することにより、効果的に伝達率は低減され、TMD 部材の質量が大きくなるに従い、その効果が大きくなることが分かった。

謝辞: 本研究を進めるにあたり、早稲田大学創造理工学部曾田五月也教授、名古屋大学澤田義博名誉教授には大変貴重な御意見、御指導を賜りました。また、本測定にあたり三井住友建設(株)池原誠一氏、西関正明氏、當内優氏、嶋田泰氏の多大なる御協力を得ました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 松田由利ほか: 建物構造体中における固体音の伝搬性状, 日本音響学会誌, 35 巻 11 号, pp.609-615, 1979.
- 2) 入江良彦: SEA 法による固体伝搬音解析, 音響学会誌, No.48, pp.433-444, 1992.
- 3) 峯村敦雄ほか: 拡張 SEA を用いた建物内固体伝搬音の予測方法と適用例, 日本建築学会計画系論文集, 第 461 号, pp.17-23, 1994.7.
- 4) 縄岡好人ほか: 電車固体音の予測に関する研究 (その 1) 地下鉄固体音の建物内伝搬, 日本音響学会講演論文集, pp.723-733, 1991.10.
- 5) 山岸邦彰ほか: 鉄道軌道に近接する免震建物の振動伝搬特性— (その 1) 地盤における振動伝搬特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.257-258, 2004.
- 6) 山岸邦彰ほか: 実測による地下鉄振動の建物内振動伝搬特性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.217-218, 2005.
- 7) 山岸邦彰ほか: 実測による地下鉄振動の建物内振動伝搬特性に関する研究— (その 2) 直接基礎を有する壁式構造の評価結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.191-192, 2006.
- 8) 流田豊, 高島秀雄ほか: 境界バネ及び中間支持を持つ梁の形状関数について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1 分冊, pp.327-328, 1996.9.
- 9) 岡富邦広, 高島秀雄ほか: 境界梁を持つスラブの簡易解析 その 2 固有振動数, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1 分冊, pp.331-332, 1996.9.
- 10) 山岸邦彰, 船水則行, 高島秀雄: 床スラブの簡易解析法とその応用, 計算工学講演会論文集 Vol.2, pp.19-22, 1997.5.
- 11) 柴田明徳: 最新耐震構造解析 森北出版 1981.
- 12) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算標準・同解説 1999.
- 13) 三谷勝之ほか: コンクリートはりの静弾性係数と動弾性係数に関する実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.39-40, 1969.8.
- 14) 吉岡修: 鉄道振動の防止対策法, 日本音響学会誌, 55 巻 6 号, pp.455-460, 1999.

(2008年2月8日原稿受理, 2008年6月2日採用決定)