

低層構造物の振動試験法の開発

—常時微動を利用した伝達関数測定法—

Development of a Vibration-test for Low Storied Buildings

—Method of Transfer Function Measurements

Using Micro-tremore Observations—

松岡 達郎

要 旨

簡便な構造物振動試験法として知られている常時微動法に厳密性を付与し、低層構造物を対象とする新しい試験法（伝達関数法）を開発した。この方法を、鉄骨造2階建倉庫を用いて精度の高い起振機法と比較することにより、実用精度が得られることを確認した。また、木造家屋に対する適用から、これまで不十分だった戸建住宅の動特性資料の収集が可能であることを示した。

1 緒言

振動規制法の施行による工場等への個別規制の結果、特に弾性支持法を主体とする振動源対策が広く普及してきたが、振動公害に対する苦情は相変わらず減少傾向を見せていない。これは、振動公害が、単に振動源対策のみで成就するものでなく、伝播媒質である地盤や受振点としての家屋構造に関する系統的な知見をもとに、土地利用政策や家屋の耐震構造化の推進などを含む総合的な諸施策が必要であることを意味する。

いま、家屋振動を、振動の発生→伝播→受振という流れの帰着点としてとらえ、各々の場を表す特性関数を用いて概念的に表現すると次式のようになる。

$$R(f) = \{P(f) \cdot Q_s(f)\} \cdot Q_r(f)$$

ここに、 $R(f)$ ；家屋振動

$P(f)$ ；振動源の加振力特性

$Q_s(f)$ ；地盤の振動伝播特性

$Q_r(f)$ ；家屋の振動応答特性

すなわち家屋振動 $R(f)$ は、振動源、地盤、家屋各々の特性関数の積で表されるが、 $R(f)$ に対する各特性の寄与は、一般に振動源近傍では $P(f)$ が大きく、離れるに従って $Q_s(f)$ 、 $Q_r(f)$ が大きくなる。したがって、特に振動公害の広域予測を行う場合などには、地盤や家屋

の特性を無視することはできない。さらに、最終的には、この $R(f)$ が人間の体感レベルを超えたときに振動公害が発現するという基本認識にたてば、どのような場合であっても家屋の特性に関する十分な配慮が必要であることは論を待たない。

しかしながら、振動源や地盤に関する知見に比べて、家屋に関しては、基本的な動特性資料（固有振動数、減衰定数、増幅度）すら十分に得られていない。これは、耐震設計上の必要性の無さから、経費、作業性、測定精度の点で低層構造物（ここでは2～3階建までの戸建住宅及び小規模集合住宅）に最適な振動試験法が、いままで開発されていなかったことも大きな理由のひとつであると考えられる。

一方、耐震設計に動的応答解析が必要な中・高層構造物については、起振機法、ロケット加振法、引き綱法及び常時微動法など種々の試験法により、動特性資料の集積が図られている¹⁾。これらの試験法を低層構造物に適用する場合、常時微動法以外は加振装置の取り付けや作業時間及び作業人員等の点でコスト高となり、現実的でない。しかし、常時微動法も、特別な加振装置が不要で極めて簡便に実施できる反面、現在行われている方法では、後述するように、精度上の問題が残る。

そこで、今回、低層構造物の動特性資料を簡便かつ

高精度で収集する方法として、常時微動法の改良による新しい振動試験法（これを伝達関数法と名付ける）の開発を試み、起振機法との比較試験を行った結果、極めて良好な一致が見られ開発目的が達せられたので報告する。

2 原理

2.1 構造物の入出力関係

構造物の近傍地盤及び構造物上で観測される常時微動の時間波形を各々 $x(t)$, $y(t)$ とし、これらを図1のような一般の線形系における入出力信号とすると、系のインパルス応答関数 $h(t)$ を用いて次式が成り立つ。

$$y(t) = \int_0^{\infty} h(\tau) \cdot x(t-\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots(1)$$

(1)式を周波数領域で書き換えると、

$$G_{yy}(f) = |H(f)|^2 \cdot G_{xx}(f) \quad \dots\dots\dots(2)$$

または、

$$G_{xy}(f) = H(f) \cdot G_{xx}(f) \quad \dots\dots\dots(3)$$

ただし、

$G_{xx}(f)$; $x(t)$ のパワースペクトル

$G_{yy}(f)$; $y(t)$ のパワースペクトル

$G_{xy}(f)$; $x(t)$, $y(t)$ 間のクロススペクトル

$H(f)$; 系の伝達関数

となる。²⁾

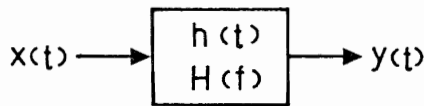


図1 線形系の入出力関係

伝達関数 $H(f)$ は、単位の振幅を持つ正弦波外乱による系の周波数応答特性を表すので、結局構造物の振動応答特性は、地盤及び構造物上の常時微動のパワースペクトルの測定 ((2)式) あるいは地盤-構造物間のクロススペクトルと地盤上のパワースペクトルの測定 ((3)式) から推定されることになる。

従来の常時微動法は(2)式を根拠とし、さらに構造物への入力となる地盤上の常時微動をホワイトノイズと仮定することにより ($G_{xx}(f) = G_0 \dots\dots$ 定数)、実際には次式のように、構造物上の常時微動のパワースペクトルが伝達関数を表すものとして、応答特性を推定してきた。

$$|H(f)|^2 = \frac{1}{G_0} \cdot G_{yy}(f) \quad \dots\dots\dots(4)$$

しかしながら、地盤の常時微動は一般に様々な周波数特性を持っており、むしろそのような性質を利用して地盤の振動特性を推定する手法さえ存在する。したがって、多くの場合、構造物（特に低層構造物）上のパワースペクトルには地盤からの入力特性が含まれており、(4)式を使った応答特性の推定は不確定性の高いものと言わざるを得ない。

これに対して、本法は(3)式を根拠とし、 $x(t)$, $y(t)$ の同時観測から両者のクロススペクトルおよび $x(t)$ のパワースペクトルを求め、 $H(f)$ を直接測定する。これにより、入力特性に関する無理な仮定を解消するとともに、図2のように入力に無関係な外乱（ノイズ）が出力に混入した場合でも、クロススペクトル $G_{xy}(f)$ が、

$$G_{xy}(f) = G_{xy}(f) + G_{xn}(f) \\ = G_{xy}(f)$$

$$(x(t), n(t) \text{ が無相関のとき, } G_{xn}(f) = 0)$$

となるためノイズの影響が除去されるなど、従来法に比べて構造物の応答特性の推定が正確になる。

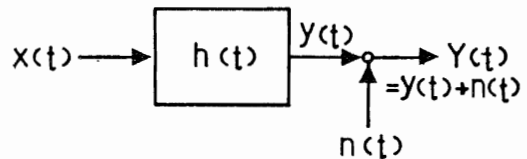


図2 出力にノイズが含まれる場合の入出力関係

2.2 動特性の算出

構造物の振動応答を最も単純な解析モデルで表現すると、図3のような1自由度系の粘性減衰モデルになる。いま、このモデルに地盤からの入力加速度 \dot{x}_0 が作用したときの運動方程式は、

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + k x = -m \dot{x}_0 \quad \dots\dots\dots(5)$$

または、

$$\ddot{x} + 2h(2\pi f_0) \dot{x} + (2\pi f_0)^2 x = -\ddot{x}_0 \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$\text{ただし } c/2\sqrt{mk} = h \quad (\text{減衰定数})$$

$$\sqrt{k/m}/2\pi = f_0 \quad (\text{固有振動数})$$

と表すことができる。

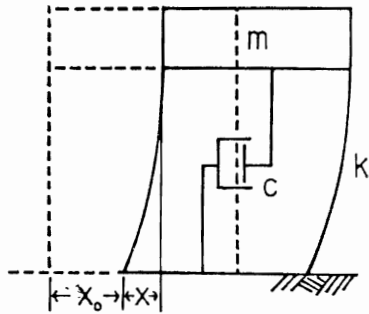


図3 1自由度系粘性減衰モデル

入力変位を $x_0 = ae^{i\omega t}$ なる正弦波として(6)式を解き、加速度応答 $H_a(f)$ を求めると、

$$H_a(f) = \frac{1}{\sqrt{\{1 - (f/f_0)^2\}^2 + 4h^2(f/f_0)^2}} e^{-i\varphi} \dots (7)$$

$$\varphi = \tan^{-1} [2h(f/f_0) / \{1 - (1 - 4h^2)(f/f_0)^2\}]$$

となる。³⁾

この $H_a(f)$ は、単位の振幅を持つ地盤加速度に対する構造物の応答を表しているので、(3)式中の伝達関数 $H(f)$ に対応する。したがって $H(f)$ が実測されれば、(7)式のモデルにあてはめることにより h 、 f_0 を求めることができる。また、(7)式で $f = f_0$ とすると、

$$|H_a(f)| = \sqrt{1 + \frac{1}{4h^2}} \dots (8)$$

となるが、これは共振時の加速度応答振幅で、共振応答倍率または増幅度と呼ばれ、(8)式あるいは実測される伝達関数の振幅から得られる。

2.3 カーブフィット手法

本法においては、固有振動数と減衰定数を算出するために、実測された伝達関数を解析モデルにあてはめる必要があるが、これは実測伝達関数を(7)式などの理論曲線(図4)で近似すること(カーブフィット)によって行われる。

従来法も同様な考え方をとるが、実際には、構造物上のパワースペクトル $G_{aa}(f)$ が伝達関数に相似した形状となることを前提としたうえで、共振状態と想定されるスペクトルのピーク値を与える周波数を固有振動数 (f_0) とし、ピークの半振幅を与える二つの周波数

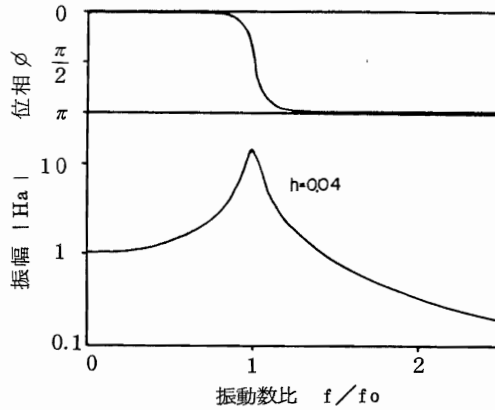


図4 理論曲線

f_1 、 f_2 から $(f_2 - f_1) / 2f_0$ として減衰定数 (h) を求めている(ハーフパワー法……図5)。しかしながら、この方法では f_0 の特定が恣意的になるほか、結局は、3点のみで曲線近似を行っていることになるため、共振点近傍のスペクトル形状のわずかなゆがみによっても、 h の算出に誤差を与える危険がある。

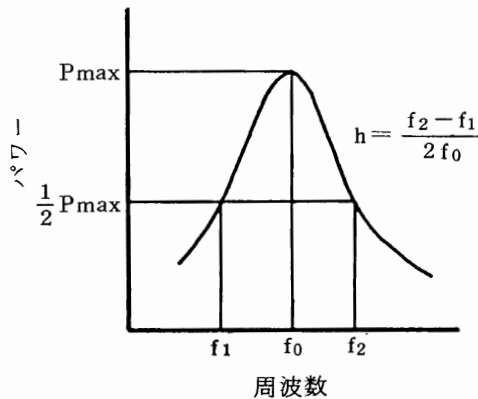


図5 ハーフパワー法

本法ではこれらの問題を解消するために、基本的には、測定周波数全体にわたって関数近似を行う。すなわち、ごく単純な1自由度系(SDOF…Single Degree of Freedom)では、(7)式のナイキスト表示が類似円軌道になることを利用した円近似を行い(サークルフィット法……図6に例示)、多自由度系(MDOF…Multi Degree of Freedom)では、測定伝達関数を逆フーリエ変換してインパルス応答関数を求め時間領域による関数近似を行う(複素指数法…これを周波数領

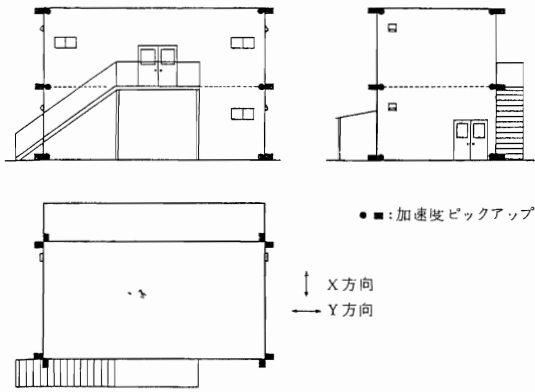


図8 ピックアップ配置

表2 分析条件

最高分析周波数	20Hz
サンプリング数	1024
サンプリング周期	1 / (20 × 2.56)
フレーム長	20sec
アベレージ数	64-128
オーバーラップ分析	1/8 フレーム長オーバーラップ
分析データ長	177.5sec ~ 337.5sec

卓越成分が4個 ($f_1 \sim f_4$) 存在することが明らかでこの建物のX方向の振動は4個のモードを持っていることが推定される。

解析モデルへのあてはめはMDOFのカーブフィットを使用し、 f_0 、 h 及び増幅度(τ)を算出した。図10にカーブフィットの一例を、表3に算出値を示す。

また、基本モード(並進モード)を識別するために全節点の伝達関数を使用したモーダルアナリシスにより、4個のモードについてモード図を求めた(図11)。図から並進モードが f_4 であることが明らかであるが、

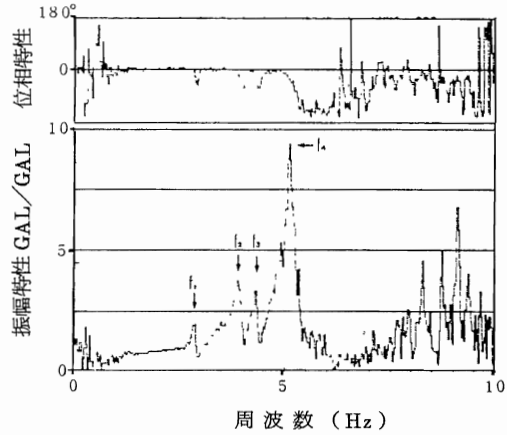


図9 実測伝達関数の一例

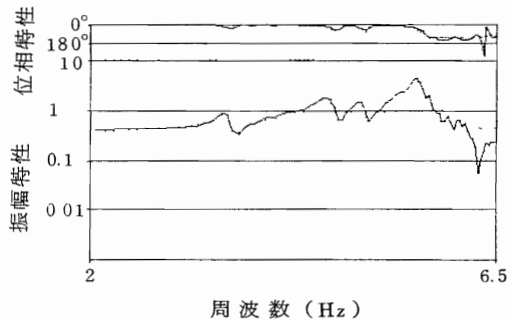


図10 カーブフィット例

$f_1 \sim f_3$ はいずれも上下方向まわりの回転モードで、 f_1 は回転中心が建物内、 f_2 、 f_3 は各々建物外の対称点にあることがわかる。

これにより、この建物の基本モードが判明したが、一般の構造物では基本モードが低次成分にあることが多く、今回の結果は特異に見える。しかしながら、この建物は両側に自転車置場や階段を構成する架構があり、剛性分布に偏りがあると思われるため、低次の回

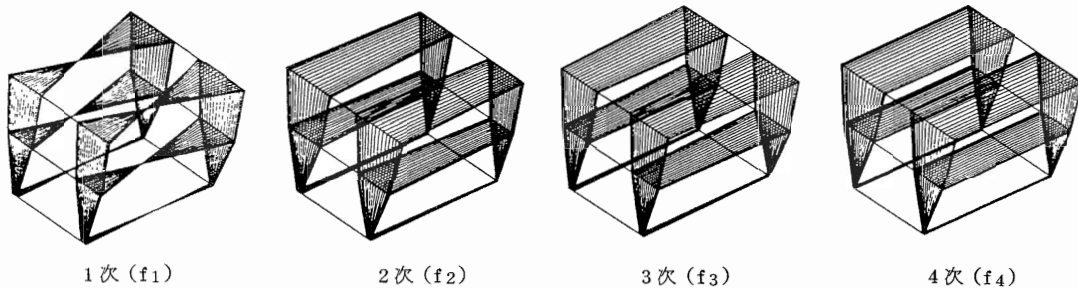


図11 モード図

転モードが現れたとも考えられよう。

なお、Y方向については有力な卓越成分が見られなかったが、これについても、この架構がY方向の動きに抵抗したためと推定される。

表3 動特性の算出値 (X方向)

次数	固有振動数(Hz)	減衰定数(%)	増 幅 度
1	2.8	1.5	1.9
2	3.9	2.5	3.8
3	4.3	2.0	3.3
4	5.1	3.6	9.5

4・2・1 起振機法による試験

伝達関数法と同様のピックアップ配置で、2階床上中央部に電磁式起振機を設置し、倉庫を正弦波加振した。加振ステップは2Hz～6Hzを0.1Hz、6Hz～9Hzを0.25Hz間隔とし、9Hzの次は10Hzで加振した。また加振制御は加速度一定とした。

2階X方向の加振加速度1G当たりの応答加速度と加振周波数の関係(共振曲線)を図12に示す。図から伝達関数法の場合と同様の4個の卓越成分が認められる。(f₁～f₄)。

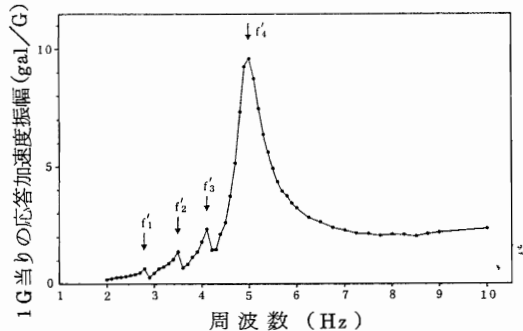


図12 共振曲線

次に、基本モードに対応する成分(f_i)の減衰定数を得るために、起振機をf_i周波数に設定して定常加振状態にした後急停止させ、建物の自由減衰振動波形を記録した(図13)。この波形から減衰部分の振幅を読み取り、対数減衰率を算出した。

表4に伝達関数法と起振機法の結果を比較したが、両者が極めて良く一致していることがわかる。

なお、起振機法においても、Y方向については伝達関数法と同様、卓越する成分が出現しなかった。

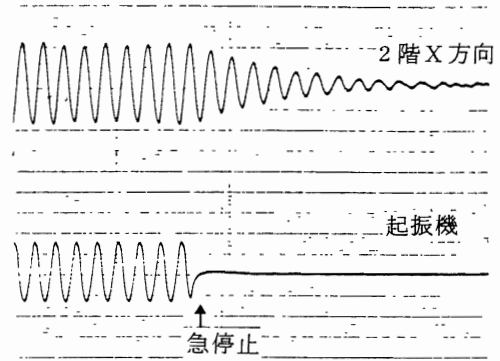


図13 自由減衰振動波形

表4 伝達関数法と起振機法の比較

次数	固有振動数(Hz)		減衰定数(%)	
	伝達関数法	起振機法	伝達関数法	起振機法
1	2.8	2.8	1.5	—
2	3.9	3.5	2.5	—
3	4.3	4.1	2.0	—
4	5.1	5.0	3.6	3.7

4・2 木造平屋建住宅

前項で、伝達関数法の厳密性が起振機法により確認されたが、一般の木造住宅への適用の可否を検討するために、図14に示すような木造平屋建住宅(在来軸組工法、建築面積79㎡)を対象として試験を実施した。常時微動の収録及び伝達関数の測定は、前述の倉庫の場合と同様の条件で行われた。また、解析モデルへの

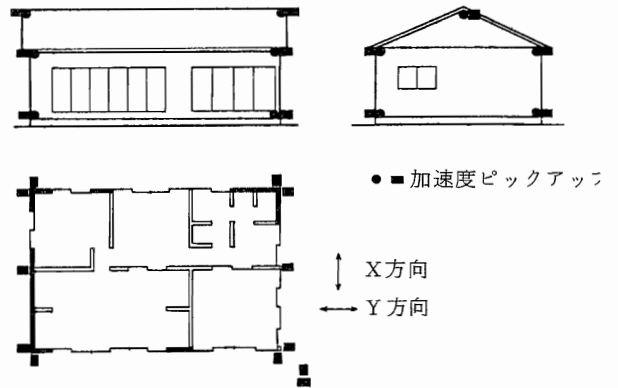


図14 ピックアップ配置

あてはめもMDOFを使用した。

図15にY方向のカーブフィットの一例を示す。図からこの家屋が単一のモードを持つことがわかるが、モード図(図16)を見ると前面(南側)の振幅が背面(北側)のそれより大きく、回転の要素が含まれていることが認められる。したがって完全な並進モードにはならないが、これは図14の平面図から明らかに、こ

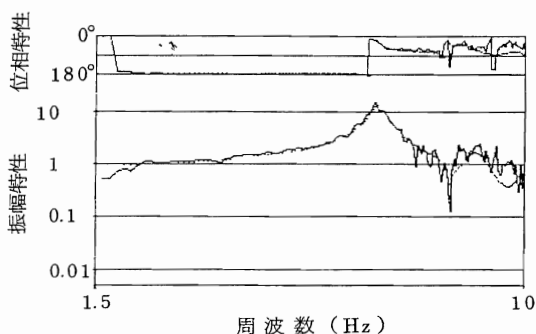


図15 カーブフィット例

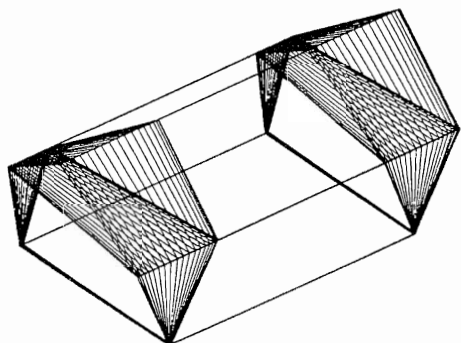


図16 モード図

の家屋の耐力壁が北側に集中していることに起因しているものと思われる。通常、戸建住宅にあっては、南側に大きな開口部を設ける場合が多いため、このような傾向がごく一般的に存在し得るものと思われる。

なお、表5にこの家屋のX方向、Y方向の f_0 、 h 、 τ の算出値を示す。

表5 動特性の算出値(X方向)

	固有振動数(Hz)	減衰定数(%)	増幅度
X方向	6.1	4.3	10.5
Y方向	5.1	2.7	14.5

5 結語

低層構造物を主な対象とする新しい振動試験法を開発した。これは従来からある常時微動法の簡便性を損わずに、起振機法などが持つ厳密性を付与したもので、地盤-構造物間の伝達関数測定と解析モデルへの関数近似を特徴とする。そこで、これを伝達関数法と呼称することとしたが、同一建物における起振機法との比較試験の結果、十分な精度を持つことが確認された。さらに、木造家屋への適用から、本法による戸建住宅の動特性資料の収集が可能であることが明らかになった。

当所では、すでに数多くの工業化住宅について本法による振動試験が実施され、 f_0 、 h 、 τ などの統計値が得られるとともに、実用上の種々の適用条件が明らかにされつつあるが、これについては稿を改めて詳述する予定である。今後、木造在来工法、ツーバイフォー工法などの住宅についても同様の作業を実施することにより、従来欠落していた戸建住宅全体の動特性資料の集積が可能となろう。

また、本法は、振動公害の受振点対策としての家屋免振工法の開発や効果測定などにも幅広く利用されるものと思われるが、さらに作業性や厳密性を向上させより高い実用性を得るための改良を図る予定である。

文 献

- 1) 日本建築学会編：建築構造物の振動実験，pp.26-70，丸善（1978）
- 2) Julius S. Bendat & Allan G. Piersol：Random Data Analysis and Measurement Procedures，pp.136-137，Wiley-Interscience（1971）
- 3) 河村壮一：耐震設計の基礎，pp.178-180，オーム社（1984）
- 4) Structural Dynamics Research Corporation：SDRC MODAL USER MANUAL Version 6.0，pp.4-1-4-22（1981）