

加振機を用いて床版の剛性を評価する方法についての一考察

(第2報：計測データがノイズを含む場合の処理法)

A study on a method to evaluate rigidity of a slab with a vibrator

(2nd report : A method to handle measured data with noise)

今西直人*, 曾根彰**, 増田新***

Imanishi Naoto*, Sone Akira, Masuda Arata

*工修, (株)アークコンサルタント (〒709-4606 岡山県久米郡久米町中北上1646)

**工博, 京都工芸繊維大学教授, 工芸学部 (〒608-8585京都市左京区松ヶ崎御所海道町)

*** 工博, 京都工芸繊維大学助教授, 工芸学部 (〒608-8585京都市左京区松ヶ崎御所海道町)

It is suitable to carry out on the basis of their stiffness in health monitoring of concrete slabs. So, in the first report, the method to identify spring constants by wavelet transform of an excitation force and response accelerations was proposed and examined. In this report, the method to identify spring constants is theoretically investigated on condition that the measured data of the excitation force and the response acceleration include noises. The method is to find the specific value of constant α in the analyzing wavelet which gives the most reliable value of the spring constant according to the graphic shape of the relation between identified mass and constant α . In addition, it is experimented with the reinforced concrete panel specimen which is 300 centimeters length, 200 in width and 18 in thickness to prove the effectiveness of the method.

Key Words : Identification, Rigidity, Slab, Wavelet Transform, Noise, Experiment

キーワード：同定，剛性，床版，ウェーブレット変換，ノイズ，実験

1. 緒言

本報告は、第1報¹⁾とともに、計測が比較的簡便な応答加速度データを用いて、道路床版をばね質点系モデルに置き換えたときのばね定数をウェーブレット変換を利用した最小二乗法によって直接同定する方法について考察を行なったものである。ばね定数の値そのものが求まれば、測定時における床版の剛性や所定の荷重が作用したときのたわみ量を推定できるので、これらを床版の維持管理の基礎データなどとして利用することが考えられる。

従来の研究^{2) - 4)}では、質量行列を同定対象から除外するため、運動方程式を構成する剛性行列および減衰行列に質量行列の逆行列を掛けたものを同定対象としている。したがって、剛性行列と減衰行列の値そのものを求めるには、同定結果に対して既知の質量行列を掛け戻してその値を求めるという処理が必要である。ところが、床版については、振動に関係する質量は拘束条件および剛性分布によって異なるので、質量行列を単純に既知のものとして設定す

ることは容易ではない。

そこで、第1報では、床版の運動方程式を構成する質量行列、減衰行列および剛性行列のすべてを直接同定することを同定に用いるデータがノイズを含まない場合であって加振力が単調正弦波で与えられるという条件のもとに検討し、本同定方法が床版の剛性評価に利用できる可能性があることをまず明らかにした。

しかし、本同定方法を用いて実構造物である床版のばね定数を同定するためには、床版をなんらかの実用的な加振手段を用いて加振する必要がある。この場合、加振力は単調正弦波のような単純なものとならないので、加振力の周波数特性や時間的な変化などを考慮しなければならない。また、現場計測による計測データには当然にノイズが含まれているのでその影響についても検討する必要がある。

そこで、本報告では、現実に利用可能な偏心質量加振機または衝撃加振機を用いて床版を加振する場合であって、加振力および応答加速度の計測データがノイズを含むときのばね定数の同定方法について、1自由度の同定モデル

による場合を対象として検討を行なった。はじめに、有限要素解析によって求めたデータを用いて検討し、データに含まれるノイズによってばね定数の同定結果が影響を受けることを示した。次に、ノイズを含むデータを用いて同定されたばね定数の中からより真値に近い値を見出す方法を検討し、質量についての推定値を用いて作成したグラフの形状上の特徴を利用する方法の有効性を示した。最後に、鉄筋コンクリート製の床版パネルを対象として加振実験を行い、上記方法の実機適用の可能性をおよそ確認した。

なお、床版は舗装が付着した合成構造体であり、床版の損傷には舗装剥離による一体化構造の変化に起因するものもある。従って、損傷現象を把握するためには、剛性の低下だけでなく質量や減衰の変化にも着目した総合的な評価が望ましく、第1報で示した同定方法によって剛性だけでなく質量および減衰に関連する指標も個別に同定することの意義が生じる。しかし、計測データに含まれるノイズが大きい場合には、そのすべてを精度よく同定することが困難になるので、本報告では、床版の損傷に最も直接的に関係すると思われる剛性の評価にのみ着目し、質量および減衰の同定精度については問題の対象としていない。

また、耐力力に影響するほどひびわれ損傷が進行すれば床版は変形が大きくなると非線形挙動を示すが、本報告が対象とする同定方法は変形初期における線形部分の剛性を評価するものである。

2. ウェーブレット変換による 構造パラメータの同定解析法

2. 1 同定解析の対象となる同定モデル

計測点を多く設ければ同定モデルの自由度を大きくすることは可能である。しかし、ここでは床版の中央たわみや1次固有振動数によって床版全体の劣化度を簡便に評価することを想定して、同定対象となるばね質点系モデルを図-1に示す1自由度のものとした。図に示すように床版の中央に質点を設け、その中央の質点は加振力を与える加振点であるとともに応答の計測点とする。

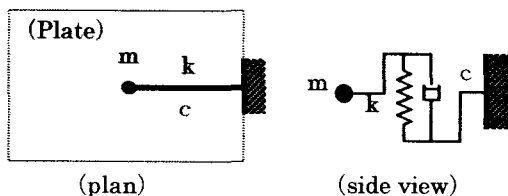


図-1 1自由度同定モデル

2. 2 ウェーブレット変換を用いた同定解析法

ウェーブレット変換を用いた構造パラメータの同定解析法の内容については参考文献^{2),3)}に詳述されているので、ここではその要約を以下に簡単に述べる。

アナライジング・ウェーブレットを $\psi(t)$ としたとき、信号 $s(t)$ のウェーブレット展開係数は、

$$\alpha_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi_{j,k}^*(t) dt = \langle s(t), \psi_{j,k}(t) \rangle \quad (1)$$

で定義される。ここに、

$$\psi_{j,k}(t) = \alpha^{j/2} \psi(\alpha^j t - k) \quad (2)$$

である。また、記号*は複素共役を、記号 $\langle \rangle$ は内積を表わし、 α は正の実数である定数、 j は整数、および k は自然数である。

いま、図1に示す構造物の動的挙動を

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) - F(t) = e(t) \quad (3)$$

と表した場合において、構造パラメータ m 、 c 、 k の同定問題を考える。このとき、計測できる信号を応答加速度 $\ddot{x}(t)$ および加振力 $F(t)$ とし、右辺の $e(t)$ は式誤差とする。

式(3)の両辺をウェーブレット変換すると、

$$\begin{aligned} m_e \langle \ddot{x}(t), \psi_{j,k}(t) \rangle + c_e \langle \dot{x}(t), \psi_{j,k}(t) \rangle \\ + k_e \langle x(t), \psi_{j,k}(t) \rangle - \langle F(t), \psi_{j,k}(t) \rangle \\ = \langle e(t), \psi_{j,k}(t) \rangle \end{aligned} \quad (4)$$

が得られる。 m_e 、 c_e 、 k_e は m 、 c 、 k の推定値を表す。

しかし、式(4)には速度 $\dot{x}(t)$ および変位 $x(t)$ が含まれているのでこのままでは同定解析に用いることができない。

ところが、アナライジング・ウェーブレット $\psi(t)$ がコンパクトサポートであることから、

$$\langle s^{(n)}(t), \psi_{j,k}(t) \rangle = \langle s(t), \psi_{j,k}^{(n)}(t) \rangle \quad (5)$$

の性質が成り立つ。ここに、 $s^{(n)}(t)$ は $s(t)$ の n 階微分($n > 0$)または $(-n)$ 重積分($n < 0$)を表わす。また、

$$\psi_{j,k}^{(n)}(t) = (-1)^n \alpha^{nj} \alpha^{j/2} \psi^{(n)}(\alpha^j t - k) \quad (6)$$

である。これらの関係から、式(4)は

$$\begin{aligned} m_e \langle \ddot{x}(t), \psi_{j,k}(t) \rangle + c_e \langle \ddot{x}(t), \psi_{j,k}^{(-1)}(t) \rangle \\ + k_e \langle \ddot{x}(t), \psi_{j,k}^{(-2)}(t) \rangle - \langle F(t), \psi_{j,k}(t) \rangle \\ = \langle e(t), \psi_{j,k}(t) \rangle \end{aligned} \quad (7)$$

と速度 $\dot{x}(t)$ および変位 $x(t)$ が含まない式に変換できるので、構造パラメータの推定値は次式で示される評価規範 J が最小となるようにして決定できる。

$$J = \sum_j \sum_k \left| \langle e(t), \psi_{j,k}(t) \rangle \right|^2 \quad (8)$$

すなわち、

$$\frac{\partial J}{\partial m_e} = 0, \quad \frac{\partial J}{\partial c_e} = 0, \quad \frac{\partial J}{\partial k_e} = 0 \quad (9)$$

の条件を連立させて m_e 、 c_e 、 k_e を求めればよい。

なお、本報告ではアナライジング・ウェーブレットとして、次式に示すガウス関数を2回微分したラプラシアンガウシアン関数を用いた。

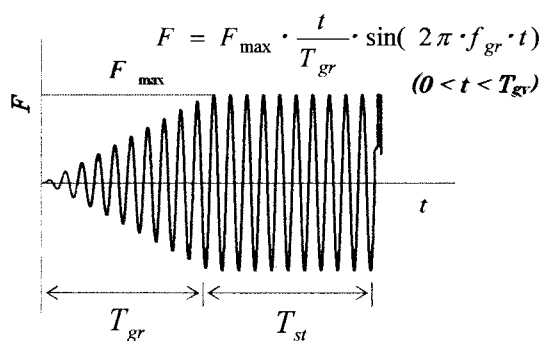
$$\psi(t) = (1 - t^2) \exp(-t^2/2) \quad (10)$$

3. 解析データによる検討

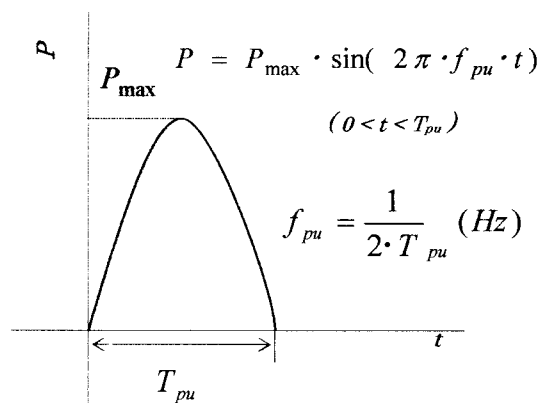
3.1 加振力

床版を振動させるための加振方法として、漸増振幅加振法および衝撃加振法が考えられる。漸増振幅加振法に用いる具体的な加振手段としては偏心質量加振機が、また衝撃加振法については落錘が一般に用いられる。

これらの加振方法におけるそれぞれの加振力を図-2のように仮定し、その基本的な特性を規定する指標を図中に示す。漸増振幅加振法についての F_{max} は加振力の最大振幅、 T_{gr} は加振開始から加振振幅が定常振幅に達するまでの時間、 T_{st} は定常振幅で加振する時間、 f_{gr} は加振振動数である。また、衝撃加振法については、加振力を半波長の正弦波でモデル化した。 P_{max} は加振力の最大値、 T_{pu} は継続時間、 f_{pu} は加振力を正弦波として考えたときの擬似加振振動数である。



(a) 漸増振幅加振力



(b) 衝撃加振力

図-2 加振力の特性

3.2 床版の加振応答解析

同定解析についての検討を行うに先立って、同定解析に用いる加振時における床版の応答データを数値シミュレーションにより求める必要がある。そこで、現実のRC床

版を想定した表-1に示す特性を有する床版モデルを対象として、床版全体を縦横4等分した有限要素モデルの中央に加振力を与えたときの中央における応答加速度を解析的に求めた⁵⁾。支持条件として、固定の程度が最も大きい4辺固定支持(FC)と最も小さい4辺単純支持(SS)を選ぶ一方、これらの支持条件では4辺の固定度が同一であるので、向かい合う2組の辺の固定度が最も異なる2辺固定2辺自由支持(CF)も選んだ。表-2は有限要素モデルによって求めた各支持条件にある床版の固有振動数を示している。4辺固定支持(FC)の1次固有振動数 f_0 は214Hz、4辺単純支持(SS)では119Hzであり、2辺固定2辺自由支持(CF)では139Hzとなっている。

表-1 床版モデルの特性

Dimensions	200×200×18 cm
Young's modulus	2.06×10^6 N/cm ²
Poisson's ratio	0.2
Unit volume mass	2400 kg/m ³
Support conditions	①Fully clamped(FC) ②Two edges clamped and other two edges free(CF) ③Simply supported(SS)

表-2 床版モデルの固有振動数 (Hz)

Support conditions of slab	Modes	Natural frequencies
Fully clamped (FC)	1 st	214
	2 nd	435
	3 rd	612
Two edges clamped and other two edges free(CF)	1 st	139
	2 nd	166
	3 rd	267
Simply supported (SS)	1 st	119
	2 nd	294
	3 rd	450

有限要素解析においては、床版全体の質量行列、減衰行列および剛性行列をそれぞれ $[M_d]$ 、 $[C_d]$ および $[K_d]$ とし、床版に作用する加振力を $\{F_d\}$ とすると、

$$[M_d]\{\ddot{x}\} + [C_d]\{\dot{x}\} + [K_d]\{x\} = \{F_d\} \quad (11)$$

が成立し、これが床版全体の振動方程式である。

減衰行列 $[C_d]$ は、次式で表される質量行列 $[M_d]$ と剛性行列 $[K_d]$ の一次結合で与えられるものを用い⁶⁾、第1次モードおよび第2次モードの減衰比 (ζ_1 , ζ_2) がともに10%であるとして α_0 および α_1 を決定した。

$$[C_d] = \alpha_0 [M_d] + \alpha_1 [K_d] \quad (12)$$

図-3は4辺固定支持床版（FC）の中央に漸増振幅加振力（ $F_{max} = 1875\text{N}$, $T_{gr} = 0.5\text{秒}$, $T_{st} = 0\text{秒}$, $f_{gr} = 20\text{Hz}$ ）を加えた場合における加振力および床版中央での応答加速度に、平均値が0で相互に独立な式(13)で与えられる分散の比 λ が20%であるガウス性白色ノイズをそれぞれに加えたもの、すなわち、ノイズを含む計測データを模擬したものを示している。

$$\lambda = \frac{\sum (n(t_k))^2}{\sum (s(t_k))^2} \quad (13)$$

ここで、 $n(t_k)$ ：時刻 t_k におけるノイズの値

$s(t_k)$ ：同じく加振力または応答加速度値の値

また、図-4は、同じく衝撃加振力（ $P_{max} = 3570\text{N}$, $T_{pu} = 0.025\text{秒}$ すなわち $f_{pu} = 20\text{Hz}$ ）の加振力を加えた場合の加振力および応答加速度を示している。

同定解析においては上記白色ノイズを含む10組の加振力と応答加速度とを用いて計算を行い、その結果得られた10組の質量 m 、減衰係数 c およびばね定数 k からなる構造パラメータの同定値のそれぞれの平均を構造パラメータの推定値（ m_e , c_e , k_e ）とした。

3. 3 計測データがノイズを含む場合についての検討

(1) 漸増振幅加振の場合

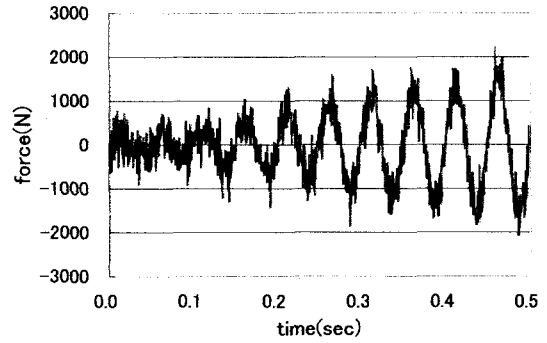
同定に用いるデータがノイズを含むとき、前出の式(2)に示すアナライジング・ウェーブレット $\psi(t)$ を構成する定数 α の値および式(8)に示す式誤差 $e(t)$ のウェーブレット変換の2乗和を構成するスケール j の最小値 j_l から最大値 j_h までの範囲 $\{j_l, j_h\}$ は同定結果に影響を及ぼす。

ここでは、まず定数 α の値を最も一般的な値である2に固定して、スケール j の範囲 $\{j_l, j_h\}$ を変化させたときにばね定数の同定精度に及ぼす影響について検討する。ばね定数の同定精度は、有限要素モデルの中央に単位の荷重を載荷したときの変位の逆数としてばね定数の真値 K を求め、この値と推定値 k_e との比の値 k_e/K によって評価した。

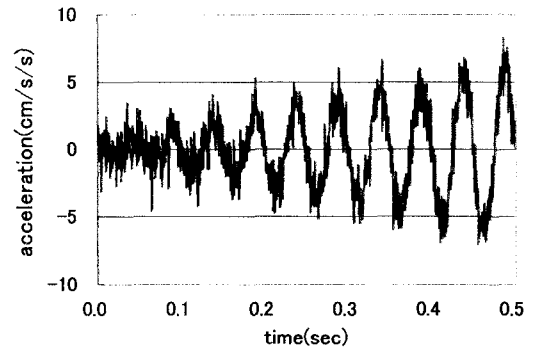
図-5は、4辺固定（FC）、2辺固定2辺自由（CF）および4辺単純（SS）の各支持条件の床版に漸増振幅加振力（ $F_{max} = 1875\text{N}$, $T_{gr} = 0.5\text{秒}$, $T_{st} = 0\text{秒}$, $f_{gr} = 20\text{Hz}$ ）を加えた場合に、床版の応答加速度および加振力の計測データに含まれるノイズについての式(13)で示される分散比をそれぞれ λ_1 , λ_2 として、 λ_1 と λ_2 の値の組み合わせ（ λ_1, λ_2 ）が（0%, 0%）、（20%, 0%）および（20%, 20%）であるときにおけるばね定数の同定精度を示している。加振力は加振機から直接計測するため応答加速度に比べて含まれるノイズを少なくできるので、 $\lambda_1 = 20\%$, $\lambda_2 = 0\%$ の場合についても示した。

図-5において床版の支持条件による差は小さく、両計測データにノイズが含まれない場合（ $\lambda_1, \lambda_2 = 0\%$ ）にはスケール j の範囲がばね定数の同定結果に及ぼす影響はほとんどなく、常にほぼ正しい値が同定されている。

一方、応答加速度の計測データにのみにノイズが含まれ

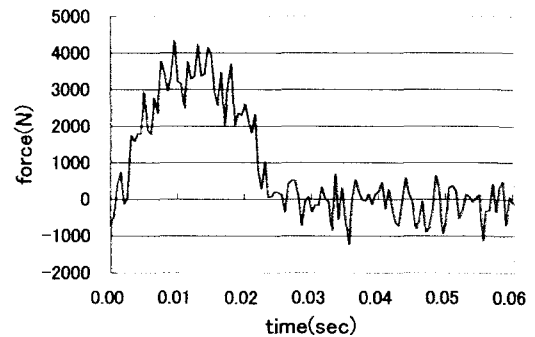


(a) 加振力

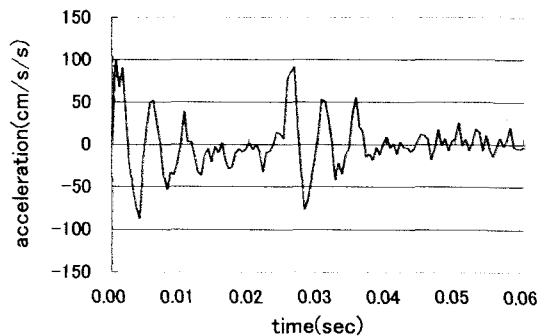


(b) 応答加速度

図-3 漸増振幅加振（FC）



(a) 加振力

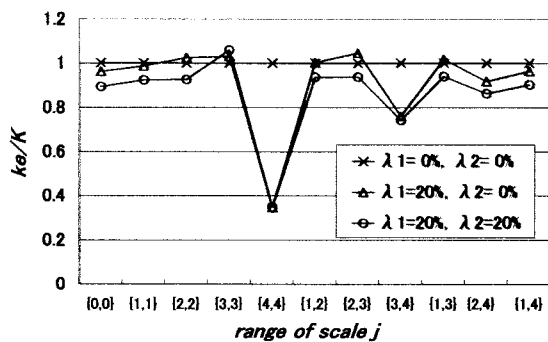


(b) 応答加速度

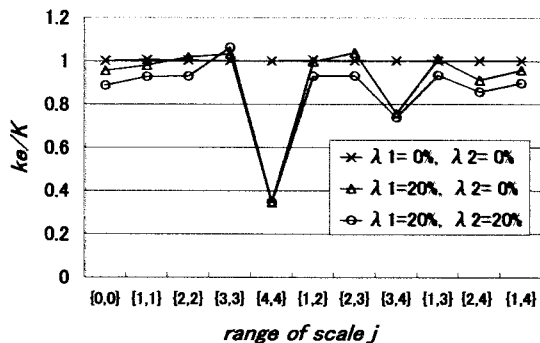
図-4 衝撃加振（FC）

る場合 ($\lambda_1=20\%$, $\lambda_2=0\%$) および両計測データにノイズが含まれる場合 ($\lambda_1, \lambda_2=20\%$) には, スケール j の範囲によってばね定数の同定精度が変動する。

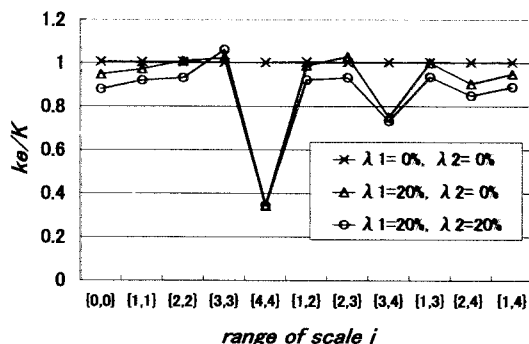
スケール j の範囲 $\{j_l, j_h\}$ のうちの j_h の値を 4 にするとばね定数の同定精度が低下するが, それ以外の組み合わせであれば同定精度は比較的良好である。とくに $\{2, 2\}$, $\{3, 3\}$, $\{1, 2\}$, $\{2, 3\}$ または $\{1, 3\}$ の組み合わせを用いれば, 両計測データにノイズが含まれる場合であっても誤差はおよそ 5% 程度に収まり, 応答加速度データにのみノイズが含まれる場合であれば誤差はそれ以下になると考えられる。



(a) 4 辺固定支持 (FC)



(b) 2 辺固定 2 辺自由支持 (CF)



(c) 4 辺単純支持 (SS)

図-5 k_e/K ~ スケール j の範囲 ($\alpha=2$)

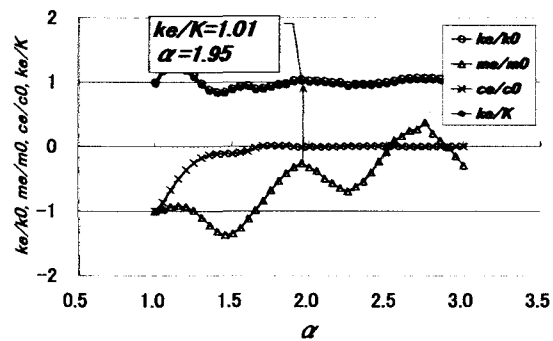
以上の検討によって, 表-1 に示す特性を有する床版に対して, 加振力の振動数 f_{gr} が 20Hz の場合にばね定数の同定精度が比較的良好となるスケール j の範囲 $\{j_l, j_h\}$ のとり方がおよそ明らかとなった。しかし, 加振力および応答加速度の計測データの両方にノイズが含まれる場合には誤差が 5% 以上程度になるので, この誤差をさらに小さくするための検討を次に行なった。また, 一般に, 加振力の振動数が適切でない場合には同定精度が低下するので, 加振力の振動数が同定精度に及ぼす影響についても同時に検討を加えた。

図-6 は, 4 辺固定支持床版 (FC) を対象として, スケール j の範囲 $\{j_l, j_h\}$ を $\{3, 3\}$ に固定し, 定数 α を 1 から次第に大きくして同定解析を行った場合に, α の各値に対する質量 m , 減衰係数 c およびばね定数 k の推定値 (m_e, c_e, k_e) と $\alpha=1$ に対する推定値の絶対値 (m_0, c_0, k_0) との比の値 ($m_e/m_0, c_e/c_0, k_e/k_0$) およびばね定数 k の推定値 k_e と真値 K との比の値 k_e/K を示している。 $\{3, 3\}$ を範囲として選択した理由は, 図-5 において比較的同定精度が良好であり, j_l と j_h とを同一としたほうが同定結果が安定すると思ったからである。加振力の振動数 f_{gr} については, 後に示す実験に用いた偏心質量加振機の振動数がおおよそ 10~20Hz の範囲にあるのでこれを考慮して 5 Hz から 40Hz まで変化させて検討した。

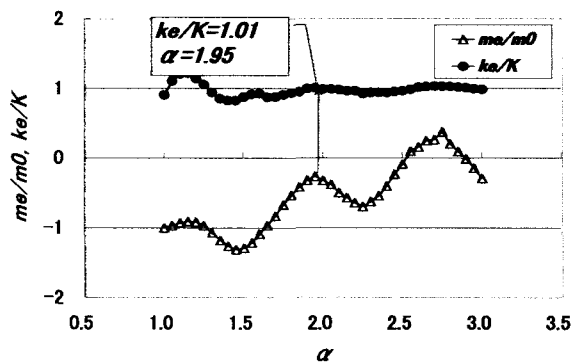
ここでの検討の目標がばね定数の推定値 k_e をさらに真値 K に近づけることであるから, ばね定数 k についての比の値 k_e/k_0 を示すグラフの形状を利用するのが一般的であると思われる。しかし, 図-6 を全体的に観察すると, 定数 α の変動に対して質量 m についての比の値 m_e/m_0 を示すグラフ形状が最も大きく変化し, グラフ形状の特徴を捉えることが容易であるので, m_e/m_0 のグラフを利用してばね定数の推定値 k_e が真値 K に近くなる時の定数 α を求める方法について検討した。

加振力の振動数 f_{gr} が 5 Hz の場合には, $\alpha=1$ から始まる m_e/m_0 のグラフは左から (山~谷~山~谷~山) なる形状をしており, 中央の山の頂上がある $\alpha=1.95$ のところで k_e/K の値がほぼ 1 となり, ばね定数の推定値 k_e が真値 K に近くなることがわかる。振動数が 10 Hz に増加すると, 中央の山はやや平坦になるが, その頂上がある $\alpha=2.0$ において k_e/K の値がほぼ 1 となっている。さらに 20Hz まで増加すると, m_e/m_0 のグラフは左から (山~谷~山) なる形状に変化するが, 谷と右の山の頂上との中間の $\alpha=1.7$ において k_e/K の値がほぼ 1 となっている。40Hz になると, m_e/m_0 のグラフの右の山の頂点の高さは 1 よりかなり低くなっており, 20Hz 以下の m_e/m_0 のグラフにおいて見られた谷と左の山が重なって棚状になる。この棚を 20Hz 以下のときの谷と考え, 棚と右の山との中間の $\alpha=1.5$ に対応する k_e/K の値は 0.93 であり, このようにして求めたばね定数の同定精度は加振力の振動数が 20Hz 以下の場合に比べて低くなっている。

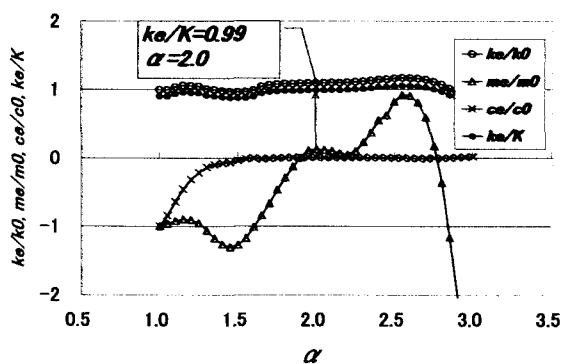
以上をまとめると, 真値 K に近いばね定数の推定値 k_e



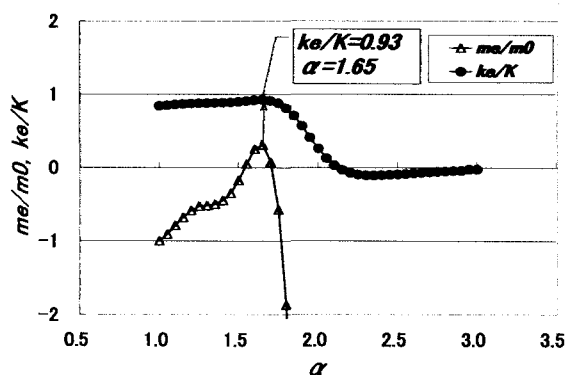
(a) 5Hz



(a) 5Hz

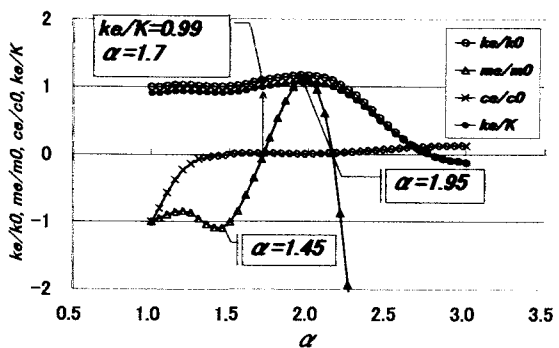


(b) 10Hz

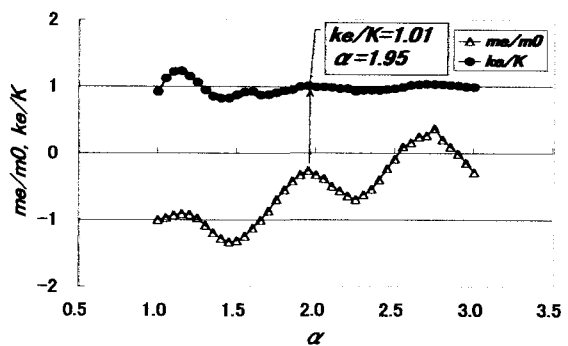


(b) 40Hz

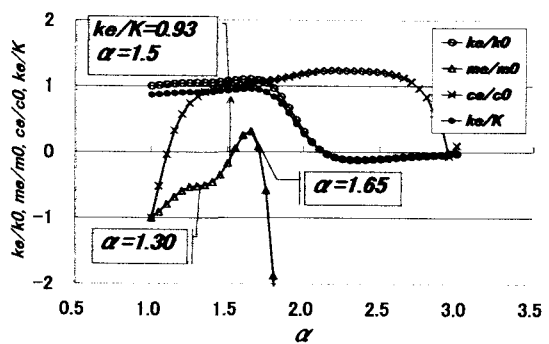
图-7 渐增振幅加振 (CF)



(c) 20Hz

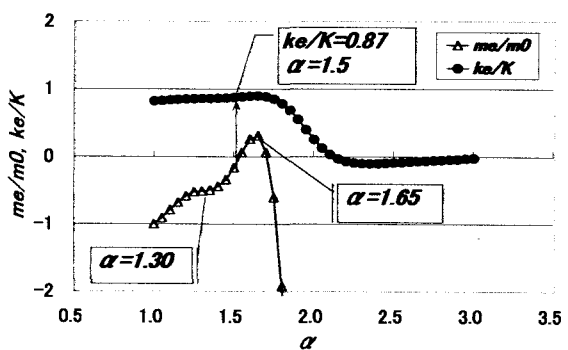


(a) 5Hz



(d) 40Hz

图-6 渐增振幅加振 (FC)



(b) 40Hz

图-8 渐增振幅加振 (SS)

を与える定数 α を求める方法として、 m_e/m_0 のグラフが左から（山～谷～山～谷～山）なる形状をしているときはその中央の山の頂上に対応する α を選び、左から（山～谷～山）なる形状をしているときは谷と右の山の頂上との中間の α を選ぶことが考えられる。一方、 m_e/m_0 のグラフが、図－7 (d) のグラフのように頂上の高さが 1 よりかなり低いひとつの山の形状となったときは、加振力の振動数が大きすぎるからであってそのためにばね定数の同定精度が低下するので、振動数を小さくして改めて計測すればよいと判断できる。

図－7 および図－8 は、2 辺固定 2 辺自由支持 (CF) および 4 辺単純支持 (SS) の床版に対する場合における定数 α と k_e/K および m_e/m_0 との関係をそれぞれ示している。これらの図に示されたグラフの形状は図－6 に示されたものとほぼ同様である。したがって、4 辺固定支持 (FC) の床版について示した m_e/m_0 のグラフを利用する方法は、これらの支持条件の床版にも適用できると思われる。ただし、加振力の振動数が 5 Hz のとき、ばね定数の同定精度は支持条件の違いによる差は小さいが、40 Hz のときは 4 辺固定、2 辺固定 2 辺自由、4 辺単純支持の順に同定精度が 0.97, 0.93, 0.87 と低下する。このことから、ばね定数の同定精度が良好な加振力の振動数の上限値は、本報告で検討した条件の範囲では、床版の固有振動数が小さいほど小さくなると考えられる。

(2) 衝撃加振の場合

次に、上記の漸増振幅加振における知見を参考として、衝撃加振の場合について検討を行なった。図－9 は擬似加振振動数 f_{pu} が 5 Hz から 40 Hz までの衝撃加振力 ($P_{max} = 3570\text{N}$) を加えた 4 辺固定支持床版 (FC) を対象とし、漸増振幅加振の場合と同様にスケール j の範囲を {3, 3} に固定して同定解析を行った結果を示している。

m_e/m_0 のグラフ形状は、漸増振幅加振の場合と同じではないので、真値 K に近いばね定数の推定値 k_e を与える定数 α の値を選ぶ方法について改めて検討した。

擬似加振振動数 f_{pu} が 5 Hz のとき、 $\alpha = 1$ から始まる m_e/m_0 のグラフは左から（山～谷～山～谷～山）なる形状をしており、中央の山は漸増振幅加振の場合と異なって左の山より低くなっている。このときは、 m_e/m_0 が最大値をとる α のところではばね定数の推定値 k_e が真値 K に最も近くなる。擬似加振振動数が 10 Hz になると、 m_e/m_0 のグラフ形状は 5 Hz のときの形状を全体的に右上がりに変形したものになる。さらに 20 Hz および 40 Hz にまで増加するとグラフ形状は 1 つの山になる。これらの図からわかるように、擬似加振振動数が 10 Hz 以上のときにおいても m_e/m_0 が最大値をとる α のところではばね定数の推定値 k_e が真値 K に近くなっている。

図－10 は、4 辺単純支持 (SS) の場合を示しており、2 辺固定 2 辺自由支持 (CF) の場合はこれとほぼ同じであるので表示を省略している。図－10 において、擬似加振振動数 f_{pu} が 5 Hz のとき、4 辺固定支持 (FC) の場合

においては m_e/m_0 のグラフに 3 つの山が存在したのと異なり、 m_e/m_0 のグラフに 2 つの山しかないが、4 辺固定支持 (FC) の場合と同様に右端の山の頂上に対応する α の値においてばね定数の推定値 k_e が真値 K に近くなることがわかる。擬似加振振動数 f_{pu} が 10 Hz, 20 Hz, 40 Hz と増加した場合におけるグラフの形状は 4 辺固定支持 (FC) の場合とほぼ同じであり、ばね定数の推定値 k_e が真値 K が近くなるときの定数 α は 4 辺固定支持 (FC) の場合と同様にして求めることができる。

なお、漸増振幅加振の場合において見られた、加振振動数と床版の固有振動数の比の値が大きい程ばね定数の同定精度が低下する傾向は、衝撃加振の場合はそれほど顕著に現れていない。

4. 実験データによる検討

4.1 実験内容

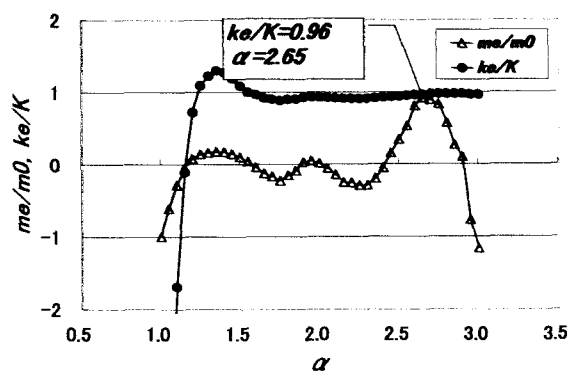
表－3 に示す特性を有する鉄筋コンクリート製の床版パネル試験体を作成し、この試験体を対象として加振実験を行なった。試験体を図－11 のように長辺側をそれぞれ上下 2 本の H 型鋼で挟んでボルトで締め付け、さらに下側の H 型鋼を地上に設置したコンクリート基礎に固定した。一方、試験体の短辺側は自由端とした。試験体を構成するコンクリートのヤング率およびポアソン比は、実験を実行した日にそのときまで型枠内で気中養生した 3 体のテストピースについて測定した値の平均である。鉄筋は試験体の短辺方向を主筋方向、長辺方向を配筋方向として図－12 のように配筋した。

試験体に加える加振力は、試験体の上面中央に設置した偏心質量加振機の回転体によって発生する漸増振幅加振力および偏心質量加振機を駆動させずにその上面にタイヤを落下衝突させて発生する衝撃加振力の 2 種類のものとした。このようにして試験体に加えられる加振力は、偏心質量加振機の底部に設けたロードセル (㈱東京測器研究所製 TCLZ-5KNA) によって計測した。また、試験体の応答加速度は試験体中央下面に取り付けた加速度計 (㈱東京測器研究所製 AR-5F) によって計測した。計測時間間隔は 0.001333 秒とした。

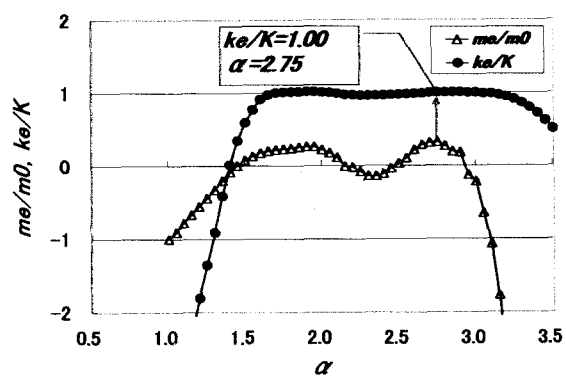
4.2 実験結果

図－13 は漸増振幅加振力とそれによる試験体の応答加速度であって、加振力の卓越振動数が 18 Hz である場合のものを示している。図－14 は加振力および応答加速度のフーリエ・スペクトルである。

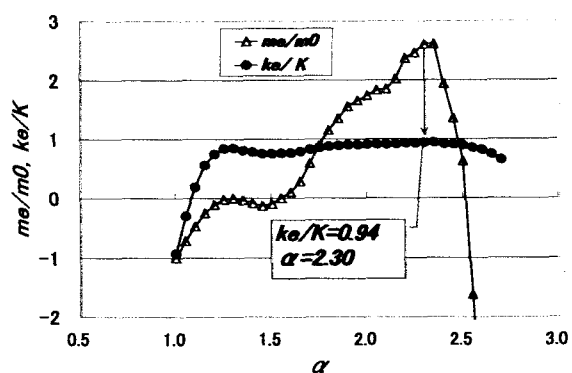
加振力のフーリエ・スペクトルにおいては、加振力の卓越振動数 18 Hz にピークがあり、その周辺の振動数成分は加振開始から加振力が安定する間における振動数の変動によるものと考えられる。また、120～130 Hz 付近に存在する振動成分は試験体の振動の影響を受けたものであると考えられる。



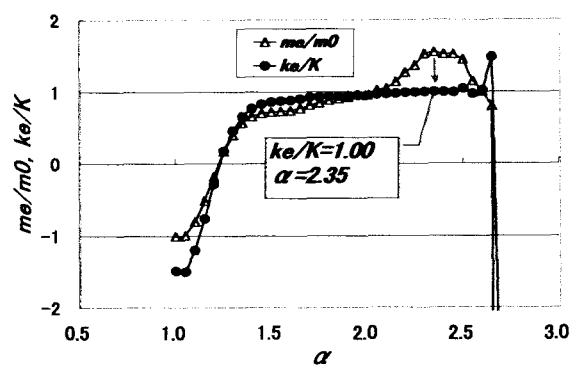
(a) 5Hz



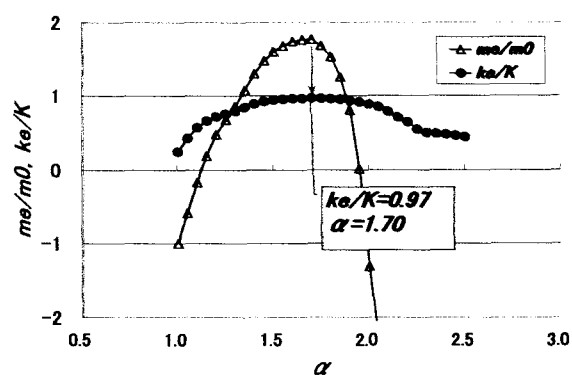
(a) 5Hz



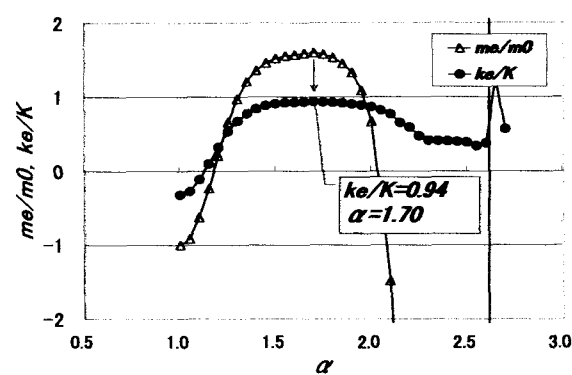
(b) 10Hz



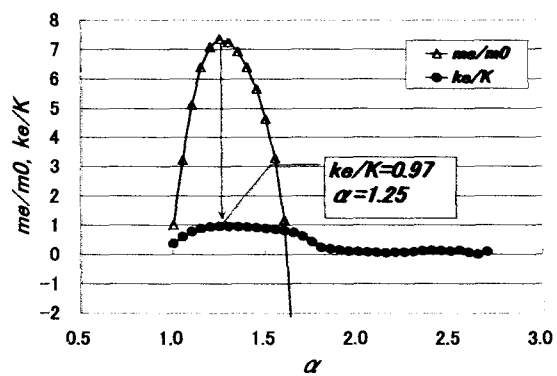
(b) 10Hz



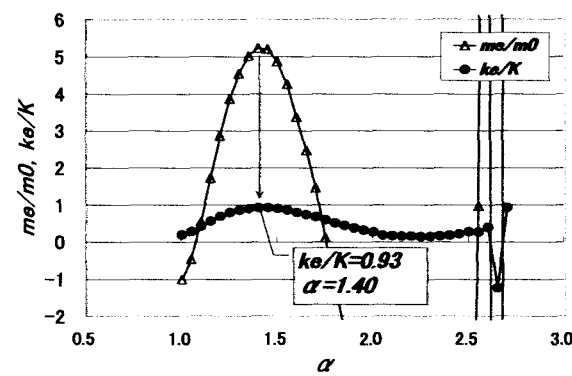
(c) 20Hz



(c) 20Hz



(d) 40Hz



(d) 40Hz

图-9 衝擊加振 (FC)

图-10 衝擊加振 (SS)

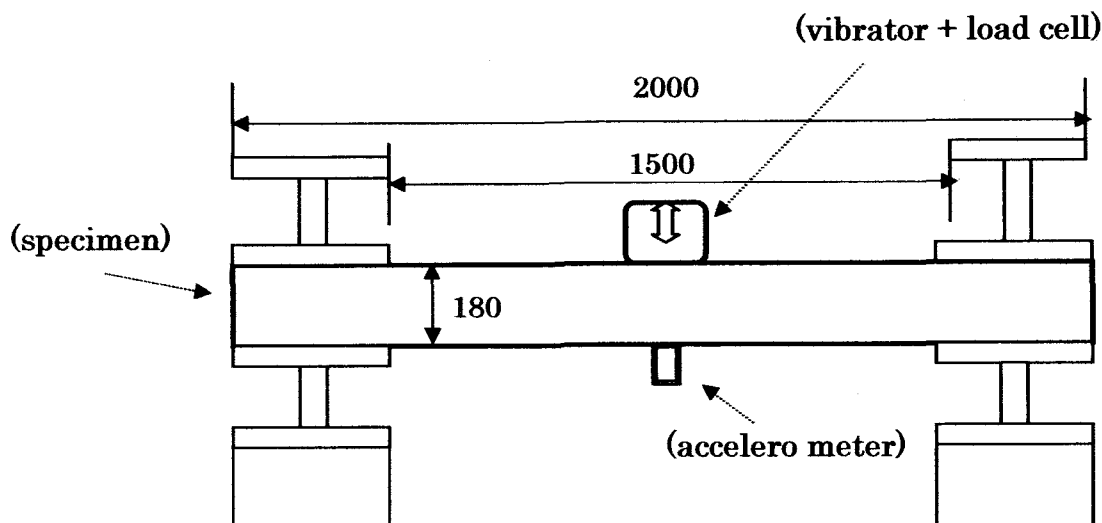


図-1 1 試験概要

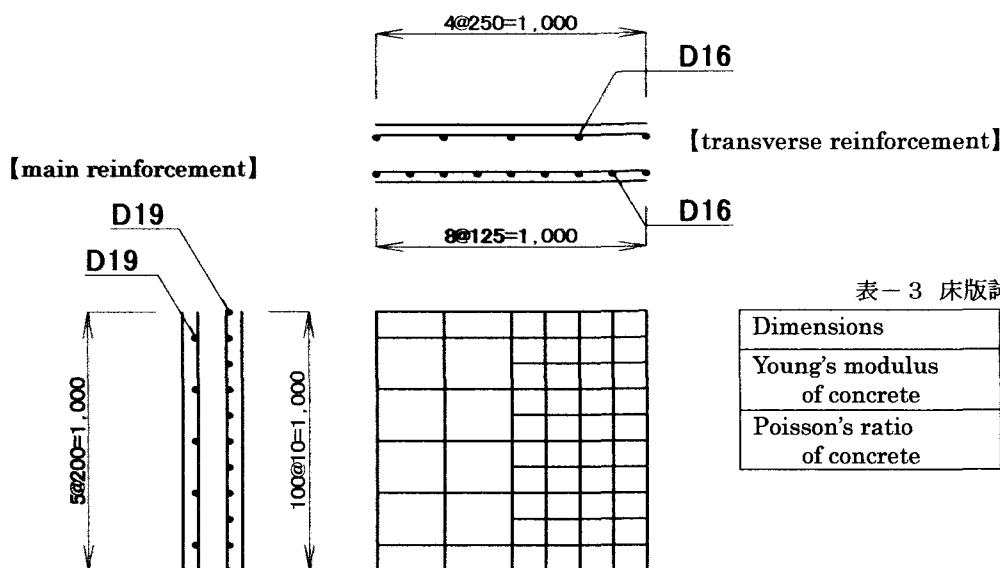


表-3 床版試験体の特性

Dimensions	300×200×18 (cm)
Young's modulus of concrete	3.19×10^6 (N/cm ²)
Poisson's ratio of concrete	0.211

図-1 2 試験体配筋図

一方、応答加速度のフーリエ・スペクトルについては、18Hzのピークは加振力の卓越振動数に対応し、121Hz付近のピークは試験体の1次固有振動数に対応する。表-3の特性を有する床版であって1次固有振動数が121Hzとなるように単純支持された長辺部に沿って 7.8×10^4 Ncm/rad/cmの回転ばねを設けた有限要素モデルについて求めた2次、3次および4次の固有振動数はおよそ144Hz、215Hzおよび340Hzである。応答加速度データには試験体の固有振動以外のノイズ成分が全振動数にわたって存在していると思われる。なお、加振力の卓越振動数が18Hz以外に16Hzおよび21Hzである場合についても実験を行った。なお、実験においては加振力の卓越振動数を加振振動数とする。

図-1 5および図-1 6は衝撃加振力による場合の実験結果について示している。この衝撃加振力を半sin波と

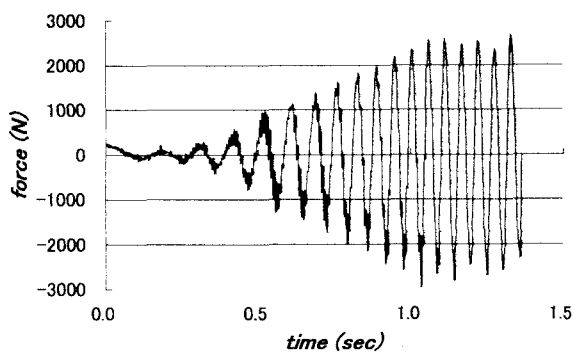
してモデル化し、これをsin波と考えたときの擬似的な加振振動数は約17Hzである。擬似加振振動数は床版に衝突させるタイヤの硬さや大きさを変えれば変化させることが可能であると思われるが、ここでは同一のタイヤを用いて実験を行ったので、擬似加振振動数はほぼ一定である。

4. 3 実験データへの処理法の適用

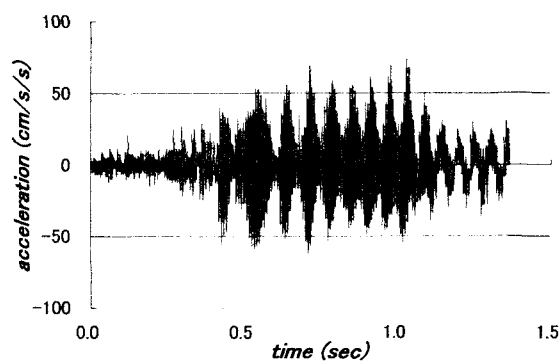
(1) 漸増振幅加振実験の場合

加振振動数を変えて行った漸増振幅加振実験の各実験データに3章で考えた処理法を適用した結果を図-1 7および図-1 8に示す。

加振振動数が16Hz、18Hzおよび21Hzである各実験ごとに定数 α と m_e/m_0 の関係を示すと図-1 7のようになる。これらのグラフの形状は、左の山の高さは低く明瞭ではないが、左から(山～谷～山)なる形状をしていると

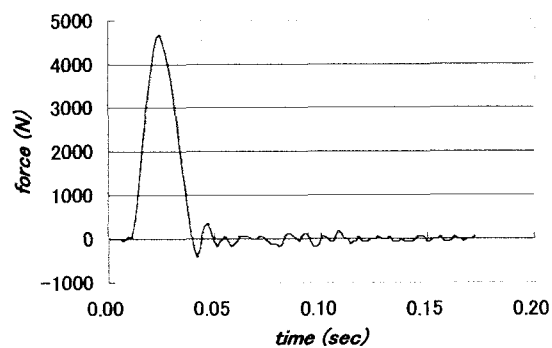


(a) 加振力

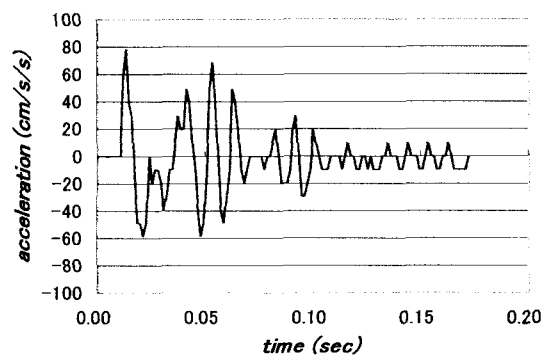


(b) 応答加速度

図-1.3 漸増振幅加振実験 (加振振動数18Hz)

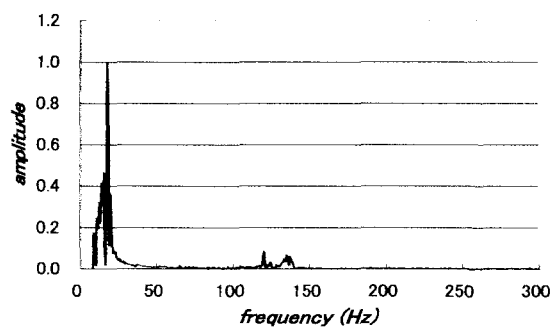


(a) 加振力

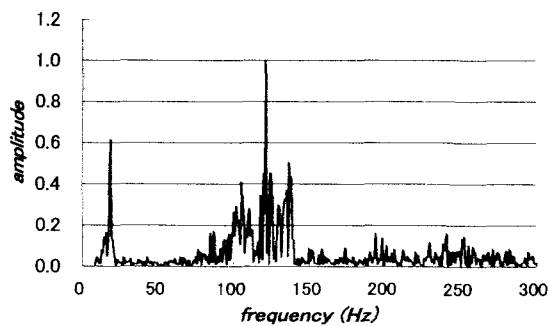


(b) 応答加速度

図-1.5 衝撃加振実験

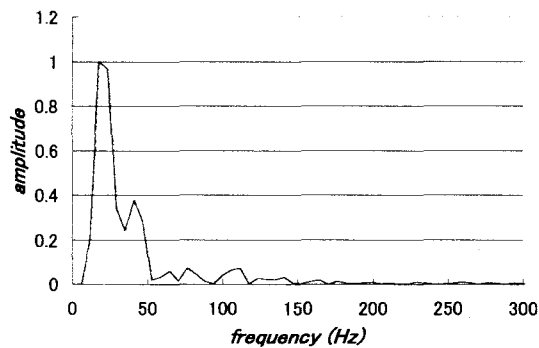


(a) 加振力

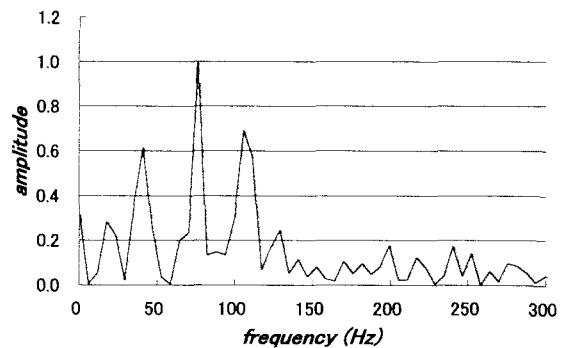


(b) 応答加速度

図-1.4 フーリエ・スペクトル
(漸増振幅加振実験：加振振動数18Hz)

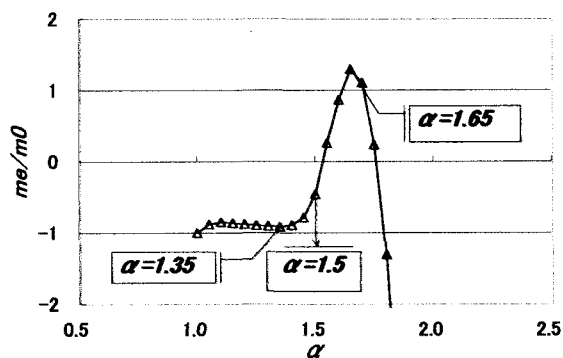


(a) 加振力

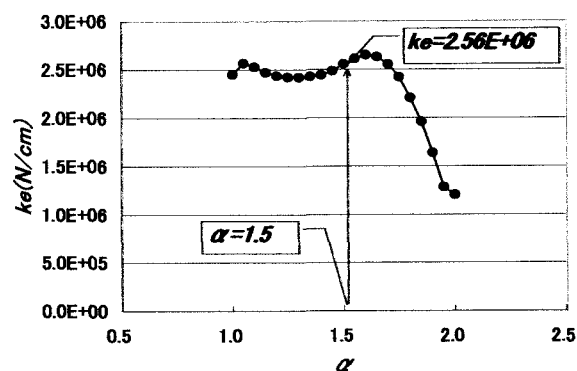


(b) 応答加速度

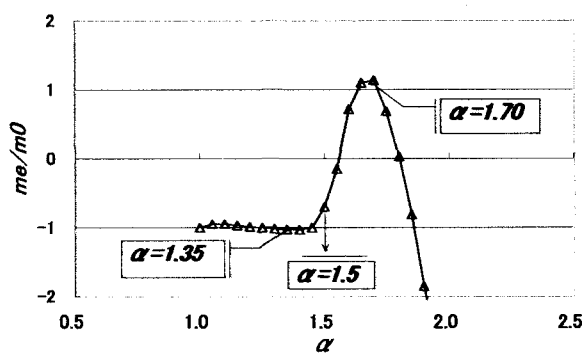
図-1.6 フーリエ・スペクトル
(衝撃加振実験)



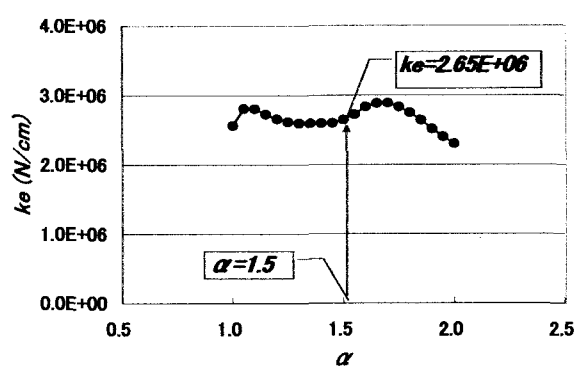
(a) 16Hz



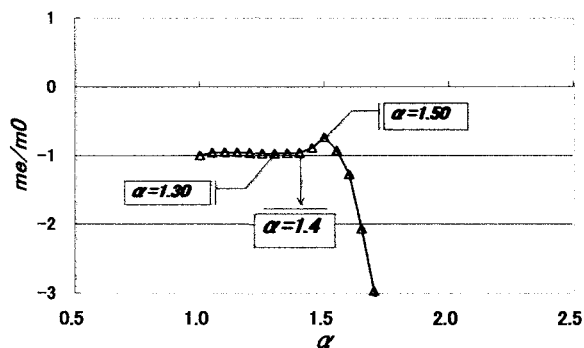
(a) 16Hz



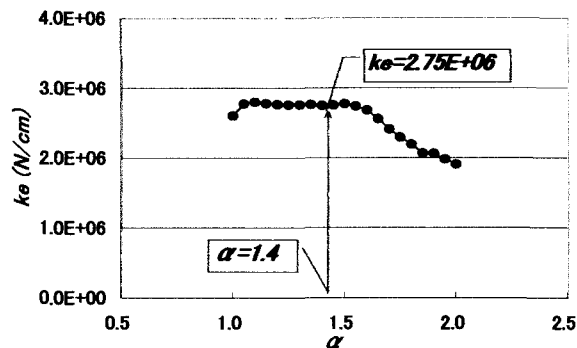
(b) 18Hz



(b) 18Hz



(c) 21Hz



(c) 21Hz

図-17 定数 α の選択

(漸増振幅加振実験)

図-18 ばね定数の同定

(漸増振幅加振実験)

考えられる。そこで、谷と右の山の頂上との中間の α を選び、ついで図-18からその α に対応するばね定数の推定値 k_e を求めると各図に示す値となる。

これらのばね定数の推定値 k_e の中でどの値を採用するかが問題となる。3章での検討において明らかになったように、加振力の振動数が21Hzのときの m_e/m_0 のグラフのように山の頂上の高さが1よりかなり低くなっているときにはばね定数の同定精度が低下する。したがって、加振力の振動数16Hzに対する $2.56 \times 10^6 \text{ N/cm}$ または18Hzに対する $2.65 \times 10^6 \text{ N/cm}$ が真のばね定数に近い値を示しているものと考えられる。

なお、実験においてはばね定数を直接計測することはできなかったが、間接的にはあるが、加振実験の結果から試験体のばね定数をおよそ推定した。すなわち、この試験体の強度特性は表-1のようであり、唯一不明なことは長辺部の固定度である。したがって、この固定度を表す回転ばねの大きさがわかれば試験体のばね定数を推定できる。そこで、図-14から試験体の一次固有振動数が121Hz付近にあると判断し、表-1の特性を有する床版であって一次固有振動数が121Hzとなるように長辺部に沿って $7.8 \times 10^4 \text{ Ncm/rad/cm}$ の回転ばねを設けた有限要素モデルで試験体がモデル化した。この有限要素モデルから求めたば

ばね定数の値 $2.50 \times 10^6 \text{N/cm}$ はであり、図-18から求めた加振力の振動数16Hzに対する $2.56 \times 10^6 \text{N/cm}$ または18Hzに対する $2.65 \times 10^6 \text{N/cm}$ なるばね定数の値はその値の102%または106%に相当する。

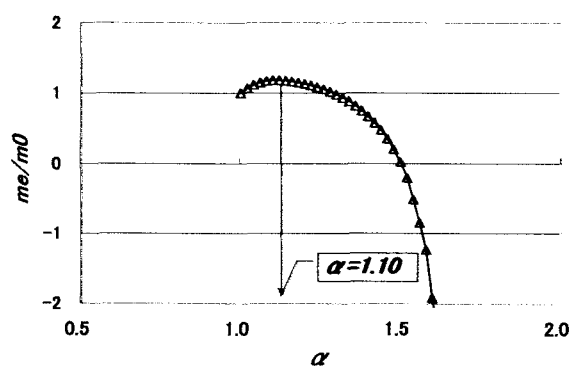
以上のように、漸増振幅加振の実験データに3章で示した処理法を適用したとき、解析データについての検討における結果とほぼ同様の結果が得られている。

(2) 衝撃加振実験の場合

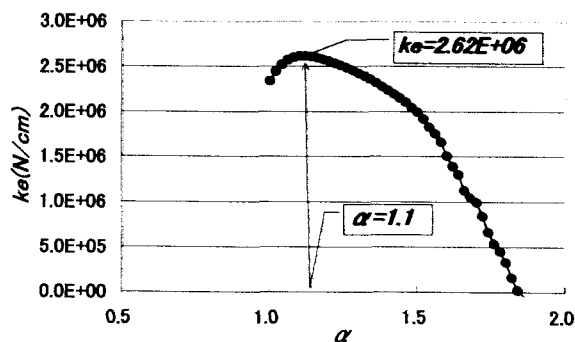
図-19は、衝撃加振実験の実験データに適用した結果を示している。図-19(a)に示す m_e/m_0 のグラフは、3章の解析データについてのグラフと少し異なっており、 $\alpha=1$ のときから α の増加に伴わずかに上昇し、山の頂上と見える箇所に達した後は単調に下降しているため完全な形のひとつの山となっていない。

しかし、これをひとつの山とみなして、3章の示した処理法と同様に山の頂上における α に対応するばね定数の推定値 k_e を図-19(b)から求めると $2.62 \times 10^6 \text{N/cm}$ である。この値は、漸増振幅加振実験の結果と非常に近いものとなっている。

衝撃加振実験は擬似加振振動数が1ケースしかないのでこれ以上の検討ができないが、衝撃加振の場合においても3章で示した処理法の一部をほぼ準用できると考えられる。



(a) 定数 α の選択



(b) ばね定数の同定

図-19 衝撃加振実験

5. 結 言

本報告では、床版を対象として、加振力と応答加速度とから1自由度のばね質点系モデルのばね定数をウェーブレット変換を用いて直接同定する場合において、データがノイズを含むときに同定されたばね定数の中からより真値に近い値を見出す方法について解析データおよび実験データによって検討した。その結果として、以下の知見を得た。

- (1) 評価規範 J を構成するスケール j の範囲 $\{j_l, j_h\}$ を小さな範囲、本報告では $\{3, 3\}$ に限定した上で、アナライジング・ウェーブレット $\psi(t)$ を構成する定数 α を変化させて同定解析を行い、 α の各値に対する推定値 m_e と $\alpha=1$ のときに同定された質量 m の推定値の絶対値 m_0 との比の値 m_e/m_0 のグラフの形状上の特徴からばね定数 k の推定値 k_e が真値 K に近い値となる α の値をおよそ推定できると思われる。
- (2) 上記の方法は、漸増振幅加振法により得られた計測データに対してはそのまま適用することができ、衝撃加振法により得られたデータに対しても一部がほぼ準用できるとと思われる。

謝 辞

本報告で示した実験は、(株)ケミカル工事で共同で行ったものであり、とくに実験の実施においては同社の山田泰行、木虎久人両氏の助力に多くを負ったことをここに記し、感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 今西直人・曾根彰・増田新：加振機を用いて床版の剛性を評価する方法について一考察（第1報：ウェーブレット変換を用いた同定方法の適用性），構造工学論文集，投稿中
- 2) 曾根彰ほか2名：常時微動と強震記録のウェーブレット解析による構造物の動特性推定とその変化の推定，日本建築学会構造系論文集，第490号，(1996.12)，65-72
- 3) 瀬川柳太郎ほか4名：常時微動加速度観測波形のウェーブレット変換によるシステムパラメータの同定，日本建築学会構造系論文集，第519号，(1999.5)，41-46
- 4) 畑宏明ほか2名：入力と加速度観測波形のウェーブレット変換によるシステムパラメータの同定，日本機械学会論文集，67-658，C(2001-6)，150-151
- 5) 川本眺万：応用弾性学，共立出版，(1985.12)，355-365
- 6) 土岐憲三：新体系土木工学11 構造物の耐震解析，技報堂出版，(1981.4)，134-135

(2004年9月17日受付)