

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1報: ウェーブレット変換を用いた同定方法の適用性)

A study on a method to evaluate rigidity of a slab with a vibrator
(1st report: Application of an identification method with wavelet transform)

今西直人*, 曾根彰**, 増田新***
Imanishi Naoto*, Sone Akira, Masuda Arata

*工修, (株)アーケコンサルタント (〒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)

Health monitoring of slabs is generally carried out on the basis of their stiffness which is evaluated from the central displacements or the first natural frequencies of them. It is, however, not easy to measure the displacements because immovable points are necessary. On the other hand, the first natural frequencies can be calculated from acceleration records to measure easily, but are less sensitive than displacements to detect the change of stiffness of slabs. Therefore, in this report, the method to identify spring constants by wavelet transform of acceleration records observed and input forces is proposed. Spring constants are, needless to say, used to evaluate the stiffness of slabs. To verify the applicability of the proposed method, numerical simulations using the finite element analysis, in which support conditions and damping characteristics of slabs are varied in wide range, are conducted. In conclusion, it is proven that the proposed method can give the good estimation for spring constants and consequently is available for health monitoring of slabs.

Key Words: Identification, Spring constants, Slab, Rigidity reduction, Wavelet transform

キーワード: 同定, ばね定数, 床版, 剛性低下, ウェーブレット変換

1. 緒言

道路橋の床版は、車両がその上を直接走行するため安全に直結しかつ疲労劣化が日々進行するので、維持管理を行なう上で比較的確かな監視が望まれる。床版の健全性をひび割れ発生状況から間接的に評価する手法も確立されているが¹⁾、残存剛性に基づいて直接的に評価するには床版のたわみ量や固有振動数を用いるのが一般的である²⁾。たわみ量を求めるために重量車両を用いて変位計測が行われ、また、固有振動数を求めるために落錘等を用いた加振により生じた応答加速度が計測されている。しかし、変位計測においては計測の基準となる不動点を設ける必要があり、河川を跨ぐなど不動点を設置し難い場合や位置が離れた多数の測定点があり不動点を多く必要とする場合には対応が容易ではない。一方、固有振動数を利用する場合は応答加速度を計測するので不動点を必要としないため簡便である。しかし、応答加速度から固有振動数を算出する方法では、質量の値を求めることができず、かつ、床版では振動に関係する質量は

周辺拘束条件および剛性分布によって変化するので質量の値を単純には設定できないため、床版の残存剛性そのものを知ることは困難である。したがって、床版の残存剛性を不動点を設けずに評価するには新たな方法に依らなければならない。

そこで、本報告では、計測が比較的簡便な応答加速度と加振力を用いて、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直接同定する手法について検討した。いうまでもなく、ばね定数が求まれば、床版全体としての剛性や所定の荷重が作用したときのたわみ量を評価することができる。

構造物に加える加振力と応答加速度とを用いて構造物の同定モデルを構成する構造パラメータを同定する解析方法としては、ウェーブレット変換を用いた最小二乗法によった。ウェーブレット変換を用いて構造物の動特性を推定する方法については既にいくつかの研究がなされている^{3)~5)}。しかし、これらの研究では、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て得られ

た運動方程式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。

しかし、本報告の対象である床版では、前述のように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。そのため、剛性行列の値そのものを求めるには、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同定の対象としなければならないが、これに伴って同定対象が増えることによる同定精度の低下が懸念される。

また、現実の計測では加速度計などの計測器を設置できる計測点の数は限られており、限定された計測データを用いて同定される同定モデルは必然的に低自由度のばね質点系モデルにならざるを得ない。そのため、同定の結果として得られたばね定数から構成される低自由度のばね質点系モデルが、元の床版の剛性をどの程度正確に再現できるかを把握しておくことも重要である。

そこで、本報告ではこれらの点を中心に検討を行った。

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 同定モデル

本報告では、床版についての同定解析対象となるバネ質点系モデルとして図-1および図-2に示すものを用いた。図-1は1自由度モデル、図-2は5自由度モデルを示している。1自由度モデルは床版の全体的な剛性を簡便に把握することが必要な日常点検への利用を意図している。一方、床版は面的な広がりを持つため劣化の進行は床版各部で異なるので、詳細点検の段階では2次元的な剛性の分布状況を把握して補修・補強箇所を絞込むことが必要の場合があると思われる。ここで、同定モデルの自由度を大きくするほど剛性分布の状況がより詳細にわかるが、計測点に限りがあることや計算が煩雑になることを考えると、図-2に示す5自由度の対角モデルおよび十字モデルを用いて床版中央を中心として対角4方向もしくは縦横4方向または両者の結果を合わせて放射状に8方向程度の剛性分布を比較できれば、床版の維持管理を実行する上で十分であると思われる。そこで、それに対応できるように図-2に示す5自由度モデルを用いて同定する場合についても検討した。

これらのモデルにおいては、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加速度の計測点のひとつとなっている。また、計測点は中央点について対称となるように設け、計測点の位置にも質点を設けている。

なお、実際の床版は舗装が付着した合成構造体であるが、本報告の検討では舗装を考慮していない。

合成構造体を対象としても同様のモデルで対応できると思われるが、この場合には、同定結果に占めるRC部分および舗装部分の影響を考慮して劣化についての判断が必要である。

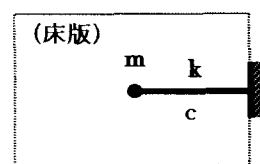
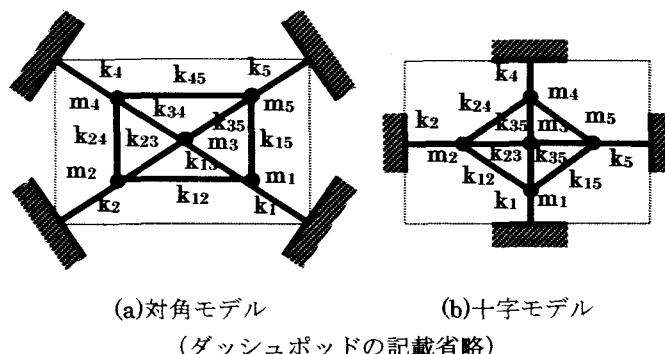


図-1 1自由度モデル



(a)対角モデル (b)十字モデル
(ダッシュポットの記載省略)

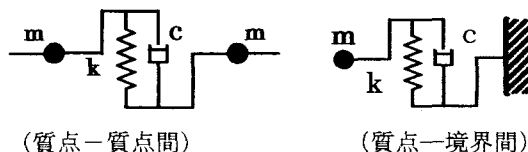


図-2 5自由度モデル

2. 2 同定解析法

ウェーブレット変換を用いた同定解析法については参考文献³⁴⁾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にとどめる。

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または図-2に示す床版の同定モデルにおける質量行列、減衰行列および剛性行列をそれぞれ $[M]$ 、 $[C]$ および $[K]$ とし、床版に加える加振力のベクトルを $\{f(t)\}$ 、各質点の変位ベクトルを $\{u(t)\}$ としたときの振

動の式は次のようになる。

$$[M]\{\ddot{u}(t)\}+[C]\{\dot{u}(t)\}+[K]\{u(t)\}=\{f(t)\} \quad (3)$$

ここに、

$$[M] = \begin{bmatrix} m_p \\ & & \\ & & \\ & & \end{bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} & & \\ & c_{pq} & \\ & & \end{bmatrix}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} & & \\ & k_{pq} & \\ & & \end{bmatrix}$$

このとき、質量行列 $[M]$ 、減衰行列 $[C]$ および剛性行列 $[K]$ を構成する構造パラメータ m_p 、 c_{pq} および k_{pq} の最確値 m_{pe} 、 c_{pqe} および k_{pqe} を求めるという同定問題を考える。観測できる信号は各質点における応答加速度 $\{\ddot{u}(t)\}$ および加振力 $\{f(t)\}$ とする。

式(3)を構成する p 行目の成分についての式誤差を $e_p(t)$ とすると、

$$m_{pe}\ddot{u}_p(t) + \sum_q c_{pqe}\dot{u}_q(t) + \sum_q k_{pqe}u_q(t) - f(t) = e_p(t) \quad (4)$$

と表すことができる。

式(4)の両辺をウェーブレット変換すると、

$$m_{pe}\langle\ddot{u}_p(t), \psi_{j,k}\rangle + \sum_q c_{pqe}\langle\dot{u}_q(t), \psi_{j,k}\rangle + \sum_q k_{pqe}\langle u_q(t), \psi_{j,k}\rangle - \langle f(t), \psi_{j,k}\rangle = \langle e_p(t), \psi_{j,k}\rangle \quad (5)$$

が得られる。しかし、式(5)には速度 $\dot{u}(t)$ および変位 $u(t)$ の項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・ウェーブレットがコンパクトサポートであること、すなわち、不定積分された関数のウェーブレット変換がアナライジング・ウェーブレットの積分と積分されるもとの関数のウェーブレット変換で表されることから、

$$\langle s^{(n)}(t), \psi_{j,k}(t) \rangle = \langle s(t), \psi_{j,k}^{(n)}(t) \rangle \quad (6)$$

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

を表わす。

従って、式(5)は次のように加速度 $\ddot{u}(t)$ と加振力 $f(t)$ とで構成される次式に書き換えることができる。

$$m_{pe}\langle\ddot{u}_p(t), \psi_{j,k}\rangle + \sum_q c_{pqe}\langle\ddot{u}_q(t), \psi_{j,k}^{(-1)}\rangle + \sum_q k_{pqe}\langle\ddot{u}_q(t), \psi_{j,k}^{(-2)}\rangle - \langle f(t), \psi_{j,k}\rangle = \langle e_p(t), \psi_{j,k}\rangle \quad (7)$$

質量行列 $[M]$ 、減衰行列 $[C]$ および剛性行列 $[K]$ を構成する構造パラメータ m_p 、 c_{pq} および k_{pq} の最確値 m_{pe} 、 c_{pqe} および k_{pqe} は、次式を評価規範 J に採用し、その値が最小となるようにして決定できる。

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

すなわち、

$$\frac{\partial J}{\partial m_{pe}} = 0, \quad \frac{\partial J}{\partial c_{pqe}} = 0, \quad \frac{\partial J}{\partial k_{pqe}} = 0 \quad (9)$$

なる条件を連立させることによって最確値 m_{pe} 、 c_{pqe} および k_{pqe} を求めることができる。

なお、本研究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・ガウス関数を用いた。

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

3. 床版の加振応答解析

同定方法について、解析データによって検討を行うには同定に用いる加振時の応答データを数値シミュレーションにより作成する必要がある。

一般に、荷重 $q(x, y)$ が作用したときの直交異方性板のたわみ量 u は板剛度 D_x 、 D_y およびポアソン比 ν を用いて次に示す微分方程式であらわせる。

$$D_x \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + 2H \frac{\partial^4 u}{\partial^2 x \partial^2 y} + D_y \frac{\partial^4 u}{\partial y^4} = q(x, y) \quad (11)$$

ここに、

$$H = D_1 + 2D_{xy} \quad (12)$$

$$D_1 = \nu \sqrt{D_x D_y} \quad (13)$$

$$D_{xy} = 0.5(1 - \nu) \sqrt{D_x D_y} \quad (14)$$

式(11)に基づき、床版の縦横を4または6等分したZienkiewiczによる有限要素モデル⁶⁾を用いて中央点に加振力を与えたときの応答を求めた。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 $\{f_d(t)\}$ とすると、

$$[M_d]\{\ddot{u}(t)\} + [C_d]\{\dot{u}(t)\} + [K_d]\{u(t)\} = \{f_d(t)\} \quad (15)$$

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た⁷⁾。

$$[C_d] = \alpha_0[M_d] + \alpha_1[K_d] \quad (16)$$

床版構造物の減衰の大きさに関しては、明確な知見がないので、第1次モードおよび第2次モードの減衰比(ζ_1 , ζ_2)を共に1, 5, 10, 30および50%と幅広く設定して検討した。

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)

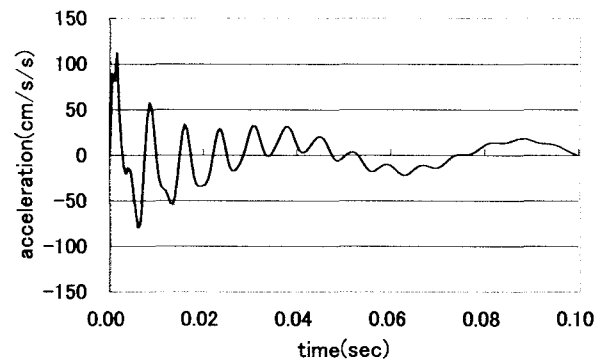
Support conditions of slab	Modes	Natural frequencies
Fully clamped (FC)	1 st	214 [0.96]
	2 nd	435 [0.96]
	3 rd	612 [0.91]
Two edges clamped and other two edges free(CF)	1 st	139
	2 nd	166
	3 rd	267
Simply supported (SS)	1 st	119[0.98]
	2 nd	294[0.97]
	3 rd	450[0.92]

表-1は本報告において検討対象とした床版の寸法および材料特性を示しており、一般的なRC道路床版を想定して設定した。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4分割の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辺固定支持床版の一次固

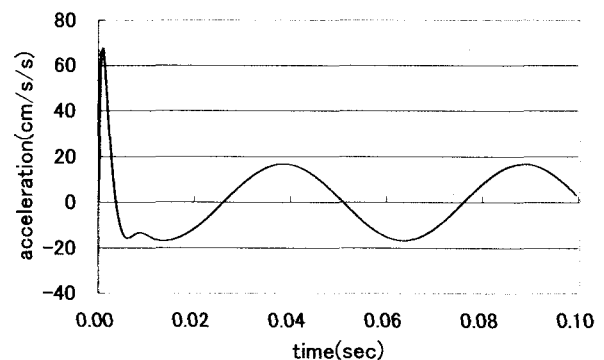
有振動数は214Hz、4辺単純支持では119Hzであり、2辺固定2辺自由支持では139Hzとなっている。固有振動数の右に記載した値は理論値または近似値⁸⁾との比の値である。有限要素モデルを用いて求めた1次および2次の固有振動数の値は理論値等の95%以上であり、3次固有振動数でも90%以上を確保しているので、有限要素モデルが床版の動特性を比較的よく再現できていると考えられる。

一方、加振力の振動数については、別途行なった加振機による加振実験⁹⁾において安定した計測データが得られた振動数がおおよそ10~20Hz前後であったことに基づき20Hzとして検討を行い、一部の事項については5~50Hzの範囲に拡大して検証した。したがって、本報告で行なった検討は、加振振動数が床版の一次固有振動数より小さい場合に限定したものとなっている。

図-3は、減衰比(ζ_1 , ζ_2)が共に1%または50%である2辺固定2辺自由支持(CF)の床版の中央点に振幅3430Nであって振動数20Hzの一定振幅正弦波である加振力を作用させたときの中央点における応答加速度波形を時間間隔0.0005秒でRunge-Kutta-Gill法によって求めたものを示している。このようにして求めた床版の各格子点における応答加速度と加振力とを用いて以下の同定解析を行なった。



(a) $\zeta_1, \zeta_2 = 1\%$



(b) $\zeta_1, \zeta_2 = 50\%$

図-3 応答加速度(2辺固定2辺自由支持(CF))

4. 1 自由度モデルによる同定についての検討

4. 1 同定精度の評価指標

床版の支持条件および減衰の大きさを変化させて得られた加振応答データを用いて1自由度の同定モデルの構造パラメータを同定し、そのときの同定精度を検討した。

個々の構造パラメータについての同定精度は、有限要素モデルの中央点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 k_0 を求め、これと有限要素モデルの一次固有振動数 f_0 から質量 m_0 を求め、さらにばね定数 k_0 および質量 m_0 と第1次モードの減衰比から減衰係数 c_0 を求めてこれらの値を検証値 (m_0 , c_0 , k_0) とし、1自由度の同定モデルの構造パラメータについての同定値 (m_e , c_e , k_e) と検証値との比の値 (m_e/m_0 , c_e/c_0 , k_e/k_0) によって評価した。また、加振力を同定モデルに作用させたときの応答加速度と、同じ加振力を有限要素モデルに作用させたときの中央点での応答加速度との相互相関係数 r_{xy} を求め、これによって同定値 (m_e , c_e , k_e) 全体としての同定精度を評価した。

なお、本報告では、2章で示した同定方法を床版の剛性検出に利用することの可能性、および同定されたばね質量系モデルの基本的特性を評価することを目的としたので、同定に用いる加振力および応答加速度にはノイズを含ませなかった。

4. 2 床版の支持条件などが同定精度に及ぼす影響

ウェーブレット変換におけるスケールの離散化を ($a = 2^j$, $j = \{2, \dots, 5\}$) とし、床版の支持条件および減衰比の大きさが1自由度モデルの構造パラメータの同定結果に及ぼす影響について検討した。

図-4、図-5および図-6は、各構造パラメータについての同定値と検証値との比の値を示している。図-4からわかるように、ばね定数についての同定精度は支持条件および減衰比の大きさからほとんど影響を受けず、安定して良好である。一方、図-5に示す質量および図-6に示す減衰係数についての同定精度は、支持条件および減衰比の大きさから影響を受け、減衰比が大きいときに低下する傾向にあると思われる。

図-7は応答加速度の相互相関係数 r_{xy} を示している。構造パラメータの同定値全体から構成される1自由度モデルによって再現された応答加速度についての同定精度は、2辺固定2辺自由支持(CF)以外の支持条件においては、相互相関係数 r_{xy} の値がほぼ1近くであり、減衰比の値の影響をほとんど受けず全体的に良好である。一方、2辺固定2辺自由支持(CF)については、減衰比が小さいとき相互相関係数 r_{xy} の値はかなり低下する。ここで注目すべきことは、4辺固定(FC)および4辺単純(SS)の両支持条件においては、動的応答についての相互相関係数 r_{xy} が良好であっても、質量 m および減衰係数 c についての同定精度が必ずしも良好であるとは限らないこ

とである。すなわち、相互相関係数 r_{xy} は質量 m および減衰係数 c の値そのものについての同定精度ではなく、両者の組み合わせに依存する傾向にあると考えられる。

加振力の振動数を5Hz~50Hzの範囲で変化させたときのばね定数の同定精度を示したものが図-8である。すべての支持条件について加振振動数の大きさに関係なくほぼ1にごく近い値で安定している。

以上から、本同定方法を用いて表-2に示す床版のばね定数を同定する場合には、加振力の振動数が5~50Hzの範囲においては、減衰比の大きさの影響を受けることなく、ばね定数はほぼ正しく同定できると考えられる。

なお、応答の非線形性が強い場合には加振力が大きいときに振幅依存性があるので考慮が必要であるが、本報告では線形応答を対象としているので加振力の大きさは一定としている。

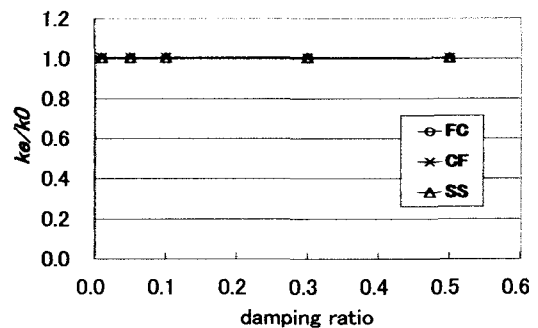


図-4 ばね定数の同定精度

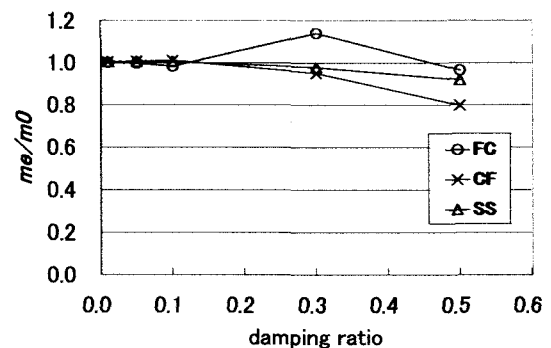


図-5 質量の同定精度

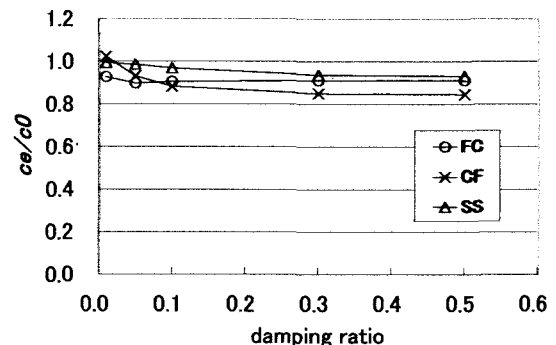
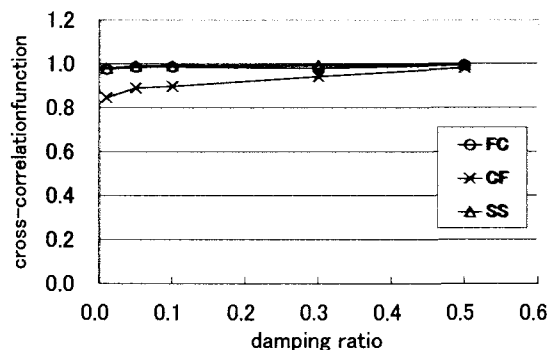
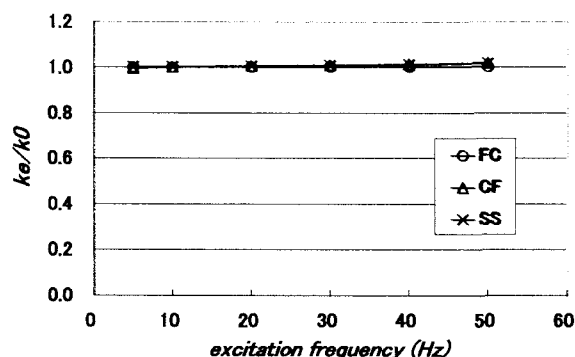


図-6 減衰係数の同定精度



図－7 相互相関係数



図－8 加振振動数の影響

5. 5自由度モデルによる同定についての検討

5. 1 ばね定数の同定精度の評価方法

図－2に示した5自由度の同定モデルを構成するばね定数 k_{pq} を同定する場合について検討した。

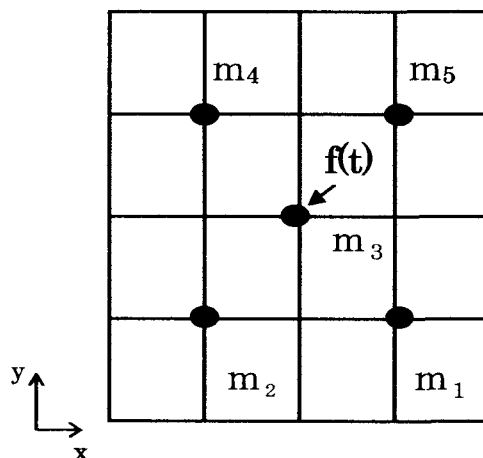
対角モデルによって同定解析を行う場合には、図－9に示すように床版全体を縦横4等分した有限要素モデルの黒丸印の位置に質点 $m_1 \sim m_5$ を設け、当該格子点における応答加速度と中央の格子点に作用する加振力とを用いて同定解析を行った。また、十字モデルの場合の質点 $m'_1 \sim m'_5$ については、 m'_3 は対角モデルの m_3 の位置と同一であって他の質点是对角モデルの質点の間に存在する格子点の位置に設けた。たとえば、質点 m_1 と m_2 との間にある格子点の位置に質点 m'_1 を設けた。

5自由度モデルの場合、同定された個々のばね定数 k_{pq} の同定精度を直接評価することはできないが、床版中央に静的荷重 (4900N) を載荷したときを想定し、同定されたばね定数 k_{pq} によって構成される5自由度の対角モデルおよび十字モデルの各質点のたわみ量 d_i と、それに対応する有限要素モデルの格子点におけるたわみ量 w_i とを直接比較したり、両者の比の値 d_i/w_i をとることによって同定精度を評価することができる。

なお、以下の検討では、加振力の振動数を 20Hz、減衰比 (ζ_1, ζ_2) を共に 10% とした。

5. 2 剛性が均一な床版の場合

はじめに、剛性が床版全体で均一、すなわち式(11)に含まれる板剛度 D_x, D_y が床版を構成するすべての要素において等しい場合について、2辺固定2辺自由支持(CF)の床版を対象として同定精度の検討を行なった。有限要素モデルによって求めた各格子点におけるたわみ量 w_i および同定されたばね定数 k_{pq} で構成される5自由度モデルから求めたたわみ量 d_i の値を図－10に示す。図中の各格子点右上の数字は有限要素モデル、右下の()内の数字は対角モデル、 $\langle \rangle$ 内の数字は十字モデルについての当該格子点におけるたわみ量(mm)である。



図－9 対角モデルの質点の位置

CF0		(固定)		
(自由)		0.509 (0.507)	0.703 <0.700>	0.509 (0.507)
		0.964 <0.959>	1.512 (1.507) <1.507>	0.964 <0.959>
		0.509 (0.507)	0.703 <0.700>	0.509 (0.507)
(固定)				

図－10 たわみ分布 (CF)

これらの値から比の値 d_i/w_i を計算すると、すべての質点を設けた格子点において約 100% であり、各5自由度モデルを構成する12個のばね定数 k_{pq} の同定精度は非常に良好であると考えられる。

また、剛性が均一な2辺固定2辺自由支持(CF)の床版の場合、対角モデルにおいては床版中央の質点以外の質

点における応答加速度は同一であるが、十字モデルにおいては支持条件の違いにより縦方向にある質点と横方向にある質点とは応答加速度が異なる。しかし、このような違いがあっても対角モデルと十字モデルとの間に同定精度の差は現れていない。

5. 3 剛性が不均一な床版の場合

次に、床版剛性の部分的な劣化を想定して、式(11)に含まれる板剛度 D_x , D_y が床版を構成する一部の要素において低下する場合を対象として検討を行なった。

図-1 1, 図-1 2 および図-1 3 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であって、着色部の要素の D_x および D_y の両方が元の大きさの 75% に低下した場合の同定結果について示している。床版の各格子点における比の値 d_i/w_i を求めると、支持条件に関わらず、すべての質点を設けた格子点において 99% 以上になっている。

図-1 4 は 2 辺固定 2 辺自由支持 (CF) の床版であって、着色部の要素の D_x のみが元の大きさの 75% に低下した場合の同定結果について示している。また、図-1 5 は同じく着色部の要素の D_y のみが元の大きさの 75% に低下した場合の同定結果についてを示している。これらの場合においても、床版のすべての質点を設けた格子点において比の値 d_i/w_i は約 100% である。

以上示したように、対角および十字の 5 自由度モデルによる同定結果を組み合わせることにより、部分的に剛性が低下した箇所を検出することができると思われる。剛性低下箇所の検出精度をさらに高めるためには、例えば、支持条件、剛性低下の程度と範囲などについて様々に変化させたときの床版のたわみ分布のデータベースを事前に作成しておき、同定されたばね定数 k_{pq} から求めたたわみ分布をこれらと照合することが考えられる。

CFX4		(固定)		
(自由)	<u>(D_x,D_y)</u>	0.543 (0.541)	0.745 <0.743>	0.528 (0.525)
		1.058 <1.055>	1.643 (1.637) <1.639>	1.001 <0.996>
		0.543 (0.541)	0.745 <0.743>	0.528 (0.525)
		(固定)		(自由)

図-1 2 たわみ分布 (CF : D_x, D_y)

SSX4		(単純)		
(単純)	(D_x, D_y)	1.051 (1.046)	1.532 <1.523>	1.010 (1.004)
		1.597 <1.589>	2.535 (2.522) <2.522>	1.499 <1.490>
		1.051 (1.046)	1.532 <1.523>	1.010 (1.004)
		(単純)		

図-1 3 たわみ分布 (SS : D_x, D_y)

FCX4		(固定)		
		0.285 (0.285)	0.546 <0.545>	0.270 (0.269)
(固定)	<u>(Dx,Dy)</u>	0.577 <0.577>	1.269 (1.268) <1.268>	0.532 <0.531>
		0.285 (0.285)	0.546 <0.545>	0.270 (0.269)
		(固定)		

図-1 1 たわみ分布 (FC : D_x, D_y)

CFDX4		(固定)		
(自由)		0.508 (0.507)	0.710 <0.708>	0.512 (0.510)
	<u>(D_x)</u>	0.959 <0.957>	1.534 (1.532) <1.532>	0.966 <0.963>
		0.509 (0.507)	0.717 <0.716>	0.509 (0.507)
		(固定)		(自由)

図-1 4 たわみ分布 (CF : D_x)

CFDY4		(固定)		
(自由)		0.538 (0.538)	0.728 <0.726>	0.526 (0.525)
		1.071 <1.067>	1.599 (1.596)	1.004 <1.001>
	<u>(Dy)</u>	0.589 (0.588)	0.758 <0.757>	0.534 (0.533)
		(固定)		

図－1 5 たわみ分布 (CF : D_y)

5. 4 質点位置が同定精度に及ぼす影響の検討

これまでの検討は、床版全体を縦横4等分した 4×4 要素の有限要素モデルの5個の格子点に質点を設ける5自由度の同定モデルを対象とした。質点を設ける位置は計測位置となるので、質点の位置が同定精度に影響を及ぼすのであれば計測位置が制約を受けることになる。

そこで、床版全体を縦横6等分した 6×6 要素の有限要素モデルにおける境界に近い側の格子点に質点を設けた5自由度の同定モデルを用いた場合の同定精度について検討した。境界に近い側の格子点でのたわみ量は、 6×6 要素の場合のほうが 4×4 要素の場合よりも小さくなるので、質点の位置が同定精度に影響を及ぼすのであれば両者の同定精度の間に差が現れると考えられるからである。

図－1 6 は2辺固定2辺自由支持 (CF) の床版であっ

CF4		(固定)			
(自由)					
	0.223 (0.222)		0.368 <0.364>		0.218 (0.218)
	0.851 <0.849>		1.591 (1.584)		0.790 <0.791>
	<u>(Dx, Dy)</u>				
	0.251 (0.250)		0.390 <0.387>		0.220 (0.219)
		(固定)			

図－1 6 たわみ分布 (CF : D_x, D_y 6×6)

て、着色部の D_x および D_y の両方が元の大きさの75%に低下した場合の同定結果について示している。この場合においても、質点を設けた床版のすべての格子点において比の値 d_i/w_i が99%以上である。したがって、 4×4 要素モデルとの比較から、質点を設ける位置すなわち応答加速度を計測する位置の取り方は、同定精度に影響を及ぼさないと考えられる。

6. 結 言

本報告では、床版の剛性評価を目的として、床版を1自由度または5自由度のばね質点系の同定モデルに置き換え、加振力と応答加速度とからばね定数をウェーブレット変換を用いた最小二乗法によって直接同定する方法について検討した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) ばね定数の同定については、本報告で検討した条件の範囲に限られるが、床版の支持条件および減衰の大きさからほとんど影響を受けず、ほぼ常に正しい値が同定されると思われる。
- (2) 5自由度の同定モデルを用いることにより、床版全体のたわみ量の分布状況から床版剛性が部分的に低下した箇所のおよその範囲を検出できるとと思われる。

参考文献

- 1) (社)日本コンクリート工学協会、コンクリート診断技術'04[基礎編]、(2004.4)、212-213。
- 2) 土木学会：橋梁振動モニタリングのガイドライン、(2000)
- 3) 曾根彰ほか3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
- 4) 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
- 5) 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)、1735-1742
- 6) 川本眺万 応用弾性学、共立出版、(1985.12)、355-365
- 7) 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
- 8) 入江敏博：機械振動学通論、朝倉書店、134-135
- 9) 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2報：計測データがノイズを含む場合の処理法)、構造工学論文集、投稿中

(2004年9月17日受付)