

I-405

周波数領域曲線適合による道路橋の動特性推定

長崎大学大学院 学生員 龍 博志 長崎大学工学部 正 員 岡林 隆敏
長崎大学工学部 正 員 小西 保則（株）長 大 正 員 有角 明

1. はじめに

道路橋を衝撃加振して衝撃力と加速度応答から、橋梁の振動特性を推定する衝撃加振試験法¹⁾を、著者らは提案している。衝撃加振法では、実験データから得られる伝達関数に線形理論より記述された伝達関数を曲線適合²⁾することにより、各モードパラメータを推定する。しかし、実測データには、常時微動等様々な雑音が含まれており、これが推定誤差の主要な原因となる。そこで、本研究では、橋梁を有限要素法により離散化モデルとし、観測雑音を考慮したシミュレーションを行い、これに基づいて周波数領域の手法であるモード円適合法³⁾および多自由度曲線適合法の有効性を検討したものである。

2. シミュレーションの方法

有限要素法に基づいて、衝撃加振応答を推定するシミュレータを作成した。図-1は衝撃加振試験法であり、図-2はシミュレーションモデルを示したものである。シミュレーションの概要を図-3に示した。観測雑音は正規乱数より作成し、フーリエ変換により0~20Hzに制限して用いている。SN比は、応答の実効値の $\sigma_s^2 = y_{max}^2/2$ と雑音のパワー σ_n^2 の比で定義する。図-4の(a)は、雑音のない変位応答スペクトルであり、(b)はSN比20%のものである。(c)は5回図-4 伝達関数のボード線図の時間平均により雑音処理した、応答のスペクトルである。

3. 周波数領域曲線適合法

3-1. モード円適合法

多自由度系において、モードの連成が少ない場合、各共振点近傍の周波数範囲でのコンプライアンスは、次のように、1自由度系として表せる。

$$G(\omega) = \frac{U_r + iV_r}{i(\omega - \omega_{dr}) + \sigma_r} + \frac{U_r + iV_r}{i(\omega + \omega_{dr}) + \sigma_r} + R_r + iI_r \quad (1)$$

ここに、 $\omega_{dr} = \Omega_r \sqrt{1 - \zeta_r^2}$ 、 $\sigma_r = \Omega_r \zeta_r$ 、 $i = \sqrt{-1}$ である。

これを複素平面上に表せば、円を描く。さらに、実測データのコンプライアンスも、共振点付近では近似的に円となる。そこで、実測データを用いて最小二乗法により最も適合する円を推定する。次に、これより得られる、中心角の変化量、円の中心、半径の情報より、モードパラメータを推定する。

$$\sigma_r = 2\Delta\omega / \Delta\phi_r, \quad \omega_{dr} = (\omega_k + \omega_{k+1})/2 \quad (2)$$

ここに、 $\Delta\omega$ は、周波数間隔、 $\Delta\phi_r$ は、中心角の最大変化量、および、 ω_k 、 ω_{k+1} は、 $\Delta\phi_r$ を挟む周波数である。

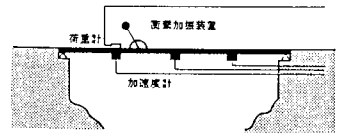
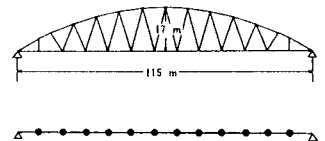


図-1 衝撃加振試験法



橋梁の諸元

橋長	115.0 (m)
ライズ	17.0 (m)
鋼重	469 (ton)

図-2 シミュレーションのモデル

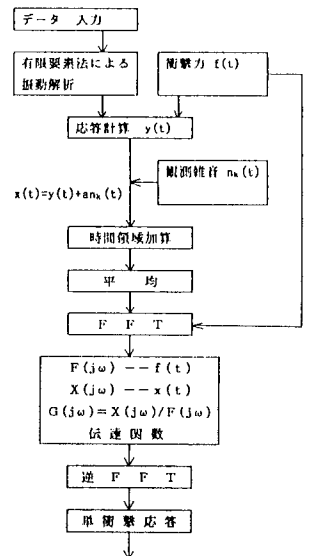


図-3 シミュレーションの方法

3-2. 多自由度曲線適合法

一般粘性減衰系のコンプラ

イアンスは、次式で表せる。

$$G(\omega, \gamma_h) = \sum_{r=1}^n \left\{ \frac{U_r + iV_r}{i(\omega - \omega_{dr}) + \sigma_r} + \frac{U_r + iV_r}{i(\omega + \omega_{dr}) + \sigma_r} \right\} - (C + iD)/\omega^2 + E + iF \quad (3)$$

推定するパラメータ、 $U_r, V_r, \omega_{dr}, \sigma_r, C, D, E, F$ をまとめて、 $\gamma_h^* (h=1 \sim 4n+4)$ とする。初期値を γ_h とすれば、推定パラメータは、

$$\gamma_h^* = \gamma_h + \Delta \gamma_h \quad (4)$$

(3)式を、 $\Delta \gamma_h$ に関してテイラー展開して一次項までとれば、

$$G(\omega, \gamma_h^*) \doteq G(\omega, \gamma_h) + \sum_{h=1}^{4n+4} \frac{\partial G}{\partial \gamma_h}(\omega, \gamma_h) \cdot \Delta \gamma_h \quad (5)$$

対象周波数領域でのコンプライアンスの理論値を $G(\omega_i, \gamma_h^*)$ 実験値を $\hat{G}(\omega_i)$ とおけば、誤差は次式で表せる。

$$E = \sum_{i=1}^m |\hat{G}(\omega_i) - G(\omega_i, \gamma_h^*)|^2 \quad (6)$$

(6)式に、非線形最小二乗法を適用し、パラメータの微小変動値 $\Delta \gamma_h$ を求める。この値を(4)式に代入して次のステップのパラメータを推定し、 E が最小になるまで繰り返す。初期値には、モード円適合法での推定結果を用いる。

4. 各推定法による結果と考察

図-5は、雑音レベルを、0~20(%)まで、5%ごと増加させた時の1次から4次振動までの、一次処理のモード円適合法と二次処理の多自由度曲線適合法での、固有振動数と減衰定数の推定誤差を示したものである。固有振動数は、一次処理では雑音レベルが増加すると少し誤差が大きくなる傾向があるが、それでも3%以内と良好な推定である。さらに、二次処理まで実施すると、4次振動について少し変動が見られるが、雑音に影響されことなく高精度の推定をしている。減衰定数については、一次処理では、固有振動数に比べると、雑音レベルの増加により少し誤差が大きくなっている。それでも、二次処理まで実施すると、1, 2次振動は雑音に影響されずに真値に近い値を推定しているし、3, 4次振動についても変動があるものの、20%以内の推定をしている。図-6は、SN比10%の時のモード円適合法による、モードの推定結果を表したもので、○ が推定値を示している。3, 4次振動について少し誤差が出てくるが、ほとんど真のモードを推定している。各推定パラメータとも、高次の振動次数の推定値の誤差が少し増大傾向にあるのは、SN比の定義が1次振動の振幅の最大値により決定されているため、高次振動については、雑音レベルが大きくなっているためだと考えられる。しかし、5次振動以上のモデルパラメータ推定では、SN比が大きくなると、多自由度曲線適合法では収束しない場合があり、非線形最小二乗法のアルゴリズムを改善する必要がある。

【参考文献】(1)岡林, 原, 梶川, 沖野: 62年土木学会第42回学術講演会。(2)長松: モード解析, 培風館。

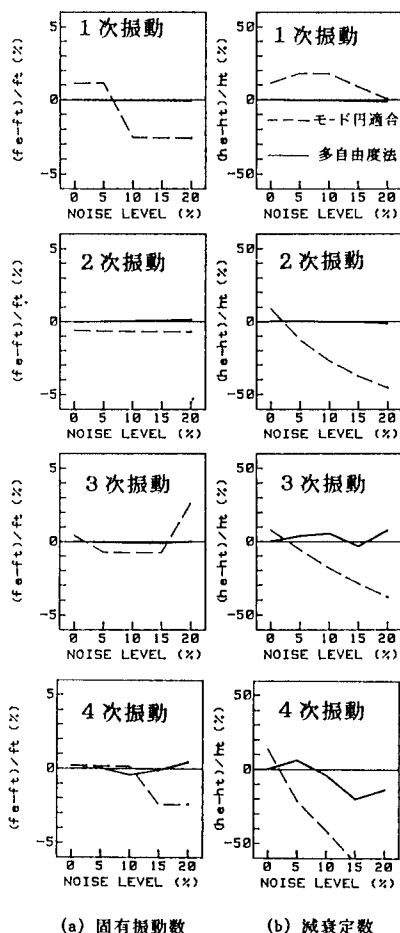


図-5 各推定量の推定誤差

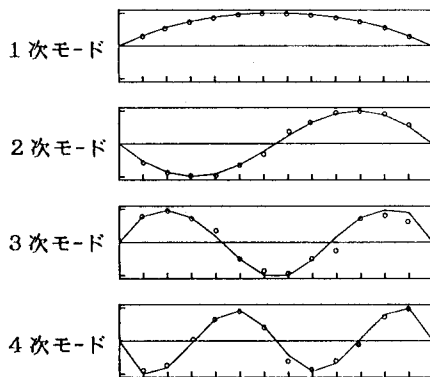


図-6 モードの推定