

二次元風洞実験の対風応答推定法に関する研究

九州工業大学大学院 学生員 ○芝尾尚晃

九州工業大学大学院 フェロー 久保喜延 正会員 加藤九州男 木村吉郎

三菱化学エンジニアリング 非会員 永田琢哉

1. はじめに

現在、多径間連続橋の空力弾性振動について橋梁全体系での対風振動応答を把握するためには、全橋三次元弾性模型を用いた風洞実験を行うのが一般的である。しかし、風洞施設は測定空間が限られているため実橋梁規模から大幅に縮小しなければならない。このことによる実験精度の低下が懸念される。一方、橋桁の一部分を対象としてモデル化する二次元剛体模型実験は、模型の縮小を抑えられ、振動系を単純化することで高い実験精度を有している。しかし、得られた結果から対象橋梁全体系の空力弾性振動を把握するのは現在のところ困難である。そこで本研究では、二次元剛体模型による自由振動実験から全体系の対風応答を推定する基礎とするために、全橋から一部分を取り出した二次元剛体模型による自由振動実験を行い、その結果から二次元風洞実験の結果を再現できる手法を確立することを目的としている。

2. 時刻歴応答推定法

本研究では、*newmark* β 法を用いて時刻歴対風振動応答値の推定を行う。以下にこの方法で用いる空力弾性振動の振動方程式を示すと、

$$\ddot{y} + 2\xi\omega\dot{y} + \omega^2 y = F \cos(\omega t + \beta)$$

$$y = y_0 \cos \omega t \quad \text{とおくと, } \dot{y} = -ny_0 \sin \omega t \quad \text{より,}$$

$$\ddot{y} + 2\xi\omega\dot{y} + \omega^2 y = (F \sin \beta / \omega y_0) \dot{y} + (F \cos \beta / y_0) y$$

$$\text{ここで, } f_{al} = (F \sin \beta / \omega y_0), \quad f_{ar} = (F \cos \beta / y_0) \quad \text{とすると,}$$

$$\ddot{y} + 2\xi\omega\dot{y} + \omega^2 y = f_{al} \dot{y} + f_{ar} y$$

$$\ddot{y} + (2\xi\omega - f_{al}) \dot{y} + (\omega^2 - f_{ar}) y = 0$$

となる。ここで、 ξ :減衰常数、 ω :固有円振動数、 F :空気力、 f_{al} :空気力の振動変位速度成分、 f_{ar} :空気力の振動変位成分である。各風速の振動状態は定常状態であるとする、式中の減衰力項がゼロとなる。また、減衰率で見ると $\delta s + \delta s = 0$ のとき定常振動状態となる。また、式中の復元力項は各風速での振動数から推定できる。これらより、 $f_{al} = -\delta_a \omega m / \pi$ 、 $f_{ar} = m(\omega^2 - n^2)$ となる。ここで、 δ_a :空力減衰率、 m :模型の質量、 n :各風速での円振動数である。

また、*newmark* β 法を用いた時刻歴応答推定を行う際、過渡応答時の振幅が重要となる。そのため、振動中の空気力に対応する振幅のモデル化を行う必要がある。そこで、振動現象が $\sin$ 波であるとする、 $y = y_0 \cos nt$ 、 $\dot{y} = -\omega y_0 \sin nt$ より、振動時の各時刻での振幅は $y_0 = \sqrt{y^2 + (\dot{y} / \omega)^2}$ となる。このようにすることで、図1のように各時刻における過渡応答時の代表変位 y_0 が求まる。これにより、振動時における振幅に対する瞬時作用空気力を計算できると考える。

3. 二次元剛体模型実験の対風応答推定

キーワード 時刻歴応答推定、代表変位、渦励振

連絡先 九州工業大学 〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1 Tel (093)884-3109

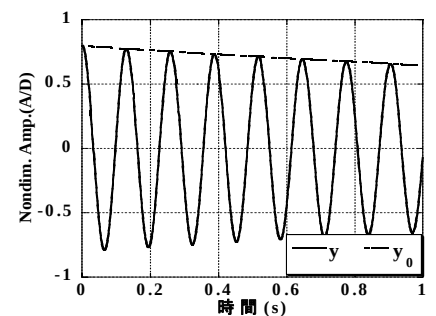


図1 過渡応答時の代表変位

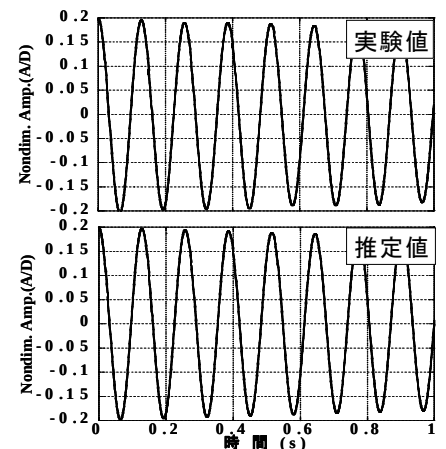


図2 たわみ振動の応答波形

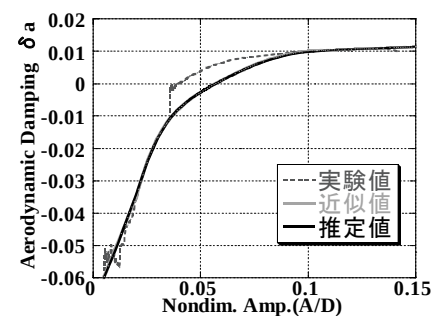


図3 たわみ振動の振幅-空力減衰率図

3-1 1 自由度たわみ応答推定

1 自由度たわみ振動実験から得た振幅-空力減衰率, 振幅-振動数の関係を近似式化し, 各時刻における振幅に対する空気力を得られるようにする. ここでは, 渦励振時のピーク時の応答を推定したものを示す. たわみ振動応答の波形について実験値と推定値を比較したものを図 2 に示す. 推定値は実験値とほぼ一致しており, 実際の振動現象を再現できている. 空力減衰率と振動数について実験値と実験値を近似化したものと時刻歴応答解析により推定した値とを比較した図を図 3, 図 4 に示す. 図 3 は横軸に無次元振幅 (A/D), 縦軸に空力減衰率, 図 4 は横軸に無次元振幅 (A/D), 縦軸に振動数 (Hz) としている. 図に示すとおり, 空力減衰率と振動数ともにほぼ一致している.

各風速での応答推定によって得られた振幅から, 渦励振域の応答図を作成した. 実験から得た応答図と推定した応答図を比較したものを図 5 に, 横軸を換算風速 ($V_r = V/fD$), 縦軸を無次元倍振幅 ($2A/D$) として示す. 図より, 渦励振発現風速, 渦励振域最大振幅が発現する風速, さらには渦励振域最大振幅値についてもかなりの精度で推定できたといえる. しかし, 全体で見ると振幅値に多少の誤差が見られる. 誤差が生じた原因としては, まず実験による空力減衰率の把握誤差が考えられる. また, 本研究では近似曲線化した振幅-空力減衰率図より推定を行ったため, 近似曲線と実験値との間で誤差が生じたと考えられる. 以上より, 実験精度の向上と精度の良い近似曲線を作成すれば, 各風速での対風振動振幅値を精度良く推定できると考えられる.

3-2 1 自由度ねじれ応答推定

さらに別の例として, 1 自由度ねじれ振動実験から得た空力減衰率, 振動数を近似式化し応答推定を行った. ここでは, フラッター発現後の風速に対して応答推定したものを示す. 空力減衰率と振動数について実験値と実験値を近似化したものと時系列応答解析により推定した値とを比較した図を図 6, 図 7 に示す. 図に示すとおり, 空力減衰率と振動数ともにほぼ一致している.

各風速での応答推定によって得られた振幅から, 応答図を作成した. 実験から得た応答図と推定した応答図を比較したものを図 8 に, 横軸を換算風速 ($V_r = V/fB$), 縦軸を倍振幅 (2Φ) として示す. 図に示すように, 実験値と推定値ともにフラッター発現風速が一致した. また応答値は, フラッター発現風速以外ではほぼ同じ値となっている. このことから, 本推定法は 1 自由度ねじれ振動応答をも再現できたと考えられる.

5. まとめ

本研究により, 精度の良い二次元剛体部分模型実験から得られた振幅-空力減衰率図, 振幅-振動数図の近似曲線を精度良く作成することで, *newmark* β 法を用いた時系列応答推定法により 1 自由度系の振動現象を再現できることが確認できた. 今後は, 二次元剛体部分模型実験から得た空気力を用いて, 同じ形状の断面を持つ三次元弾性模型の対風応答を推定する. なお, 本推定法は特許申請を行っている.

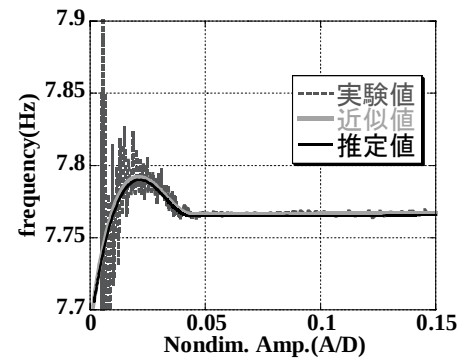


図 4 たわみ振動の振幅-振動数図

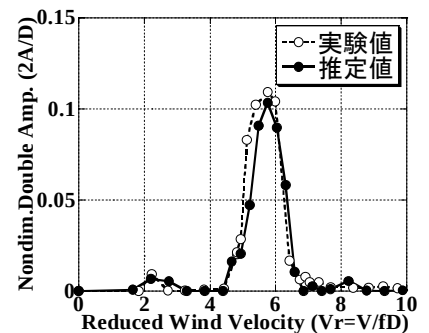


図 5 1 自由度たわみ応答図

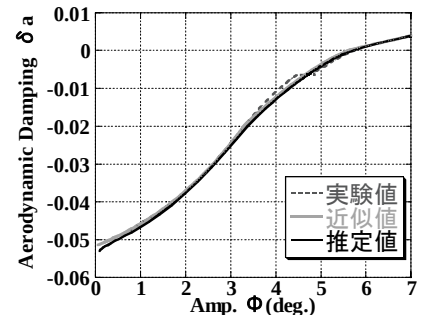


図 6 ねじれ振動の振幅-空力減衰率図

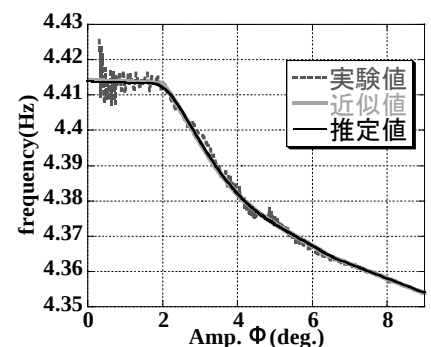


図 7 ねじれ振動の振幅-振動数図

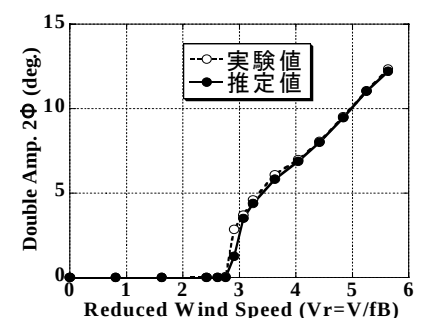


図 8 1 自由度ねじれ応答図