

空力弾性振動の時刻歴応答シミュレーション法に関する研究

九州工業大学大学院 フェロー ○久保 喜延

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 正会員 木村 吉郎、加藤 九州男

1. はじめに

構造物の外力による時刻歴応答推定法は、耐震工学の分野では古い歴史を持っており、動的解析として設計にも用いられるようになって来ている。ところが、橋梁の耐風工学の分野では、外力の特性を十分に把握できないことが原因で、これまで必要とはされながらも、時刻歴応答解析手法が具体的に提案されたことがないと言っても過言ではない。時刻歴応答解析が可能になれば、風洞実験のみに頼ってきた構造物の対風特性の検討をシミュレーションで行えるようになることで、耐風設計にも応用することが可能となり、耐風設計が設計の分野においても耐震設計と同等の地位を確保することができる。構造物の対風特性を検討する場合に、構造特性を種々変更した場合を想定した風洞実験を行うことには限界があること、また、乱流中での構造物の応答挙動をシミュレーションすることはかなり困難であることなどを考えれば、これらの課題を時刻歴応答解析でシミュレーションすることができれば、耐風工学において大きな貢献をすることになるであろう。対風応答に関するシミュレーションについて言えば、FEMによるフラッター解析がある。これは複素固有値解析でかなりの精度まで検討することが可能になったが、フラッターの発生の有無を決定することはできるものの、応答振幅を追跡することはできない。

そこで、構造物の対風挙動を時刻歴で検討できるシミュレーション法の構築の検討を行った。運動方程式を解く方法は、これまでによく用いられてきている直接積分法の1つであるニューマークのβ法である。

2. 対風時刻歴応答推定法の考え方

これまでに、空力弾性振動の時刻歴応答シミュレーションが行えなかった大きな理由は、過渡的に変化する応答振幅に対して時々刻々の振幅の変化に対応した空気力を推定する方法が見つからなかったことである。時刻歴対風応答を可能にするためには、先ほども述べたように、減衰状態や発散状態における時々刻々の振幅を、測定された非定常空気力を導入できるように捉えられるようにすることが鍵となる。

空力弾性振動が、正弦波動的な振動で減衰したり発散したりするものであると仮定すると、そのときの正弦波振動の振幅は以下のように考えることができる。正弦波減衰変位振動が次式で表されるとして、橋梁の対風応答を検討する場合 $h < 0.01$ 程度であることを考慮すれば、次式のようになる。

$$y = y_0 e^{-hnt} \cos n't \quad n' = n\sqrt{1-h^2}$$

$$\dot{y} = -y_0 e^{-hnt} n' \left(h \frac{n}{n'} \cos n't + \sin n't \right)$$

$$\sqrt{y^2 + \left(\frac{\dot{y}}{n'} \right)^2} = y_0 e^{-hnt} \sqrt{(\cos n't)^2 + \left(h \frac{n}{n'} \cos n't + \sin n't \right)^2}$$

$$= y_0 e^{-hnt} \sqrt{1 + \left(h \frac{n}{n'} \cos n't \right)^2 + 2h \frac{n}{n'} \cos n't \sin n't}$$

$$\approx y_0 e^{-hnt}$$

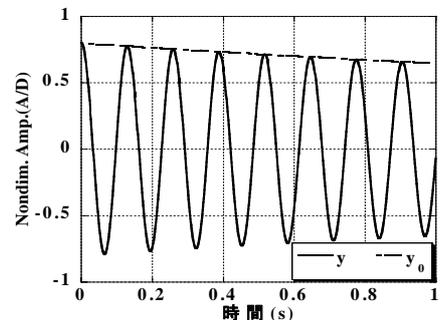


図-1 過渡応答時の振動振幅

すなわち、時々刻々の振動振幅に対応する正弦波振幅がその時刻における変位と変位速度のそれぞれの自乗和の平方根で表現できることになる。

このことを示したのが図-1である。破線は上式で計算された時々刻々の正弦波振幅である。これによって、発散および減衰状態にある時々刻々の変位に対応する代表正弦波振幅を得ることができ、この

振幅に対応する非定常空気力を推定し、この推定された非定常空気力を時々刻々振動方程式に導入することで時刻歴応答を推定することができる。時刻歴応答を推定するには直接積分法を用いればよい。

3. 部分剛体模型実験による時刻歴応答推定結果

この考え方の妥当性を検討するために、図-2 に示す箱桁断面桁を用いて、バネ吊り 1 自由度振動系の空力弾性応答測定結果と提案する手法による推定結果を比較することにした。非定常空気力の速度比例成分に対応する空力減衰率を算出する際に、同時に応答振動数を算出することにより、いわゆる非定常空気力の変位比例成分をも得ることができる。これらを直接用いてもよいが、関数近似を行っておく方が都合が良い。その関数近似を行ったものが図-3 である。前章で検討した方法で振動時の時々刻々の正弦波振幅を求め、その振幅に対応した空力減衰率および復元力項を求め、次式の自励振動方程式の空気力項に導入する。

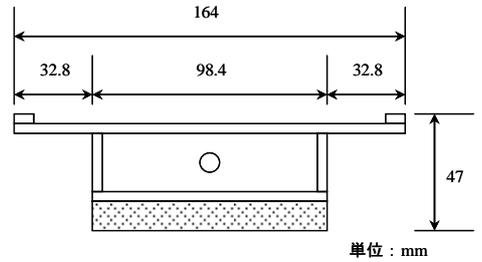


図-2 検討に用いた箱桁断面桁

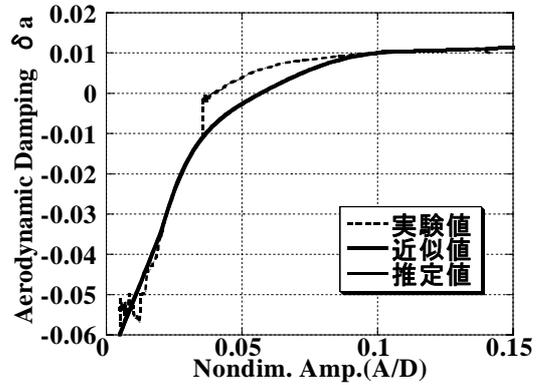


図-3 Vr=5.76 の A-δ 比較

$$\begin{aligned}
 m\ddot{y} + c\dot{y} + ky &= F \cos(\omega t + \beta) \\
 y &= y_0 \cos \omega t, \quad \dot{y} = -ny_0 \sin \omega t \quad \text{より} \\
 m\ddot{y} + c\dot{y} + ky &= (F \sin \beta / \omega y_0) \dot{y} + (F \cos \beta / y_0) y \\
 f_{aI} &= (F \sin \beta / \omega y_0), \quad f_{aR} = (F \cos \beta / y_0) \quad \text{とおくと} \\
 m\ddot{y} + c\dot{y} + ky &= f_{aI} \dot{y} + f_{aR} y \\
 m\ddot{y} + (c - f_{aI}) \dot{y} + (k - f_{aR}) y &= 0 \\
 \ddot{y} + (2\xi\omega - f_{aI}/m) \dot{y} + (\omega^2 - f_{aR}/m) y &= 0
 \end{aligned}$$

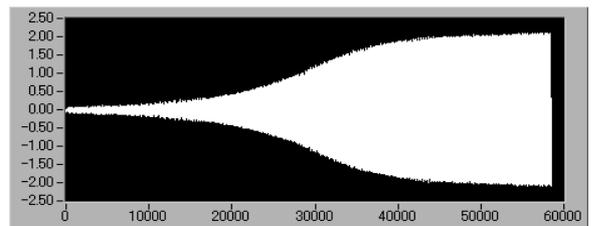
これを直接積分法で時間刻みに応じた時刻歴を計算する。

図-4 (a)に測定時刻歴応答波形を、図-4(b)に本論文で検討を行った手法による時刻歴応答解析波形を示している。また、図-3 の推定値はその解析波形から算出した空力減衰率である。実験値、近似値、推定値はほぼ一致している。

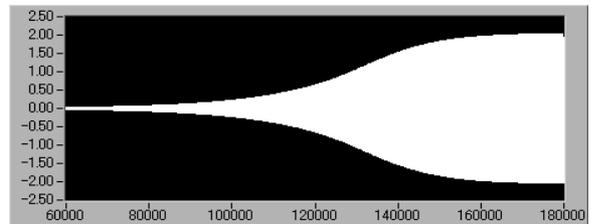
この時刻歴解析を実験での風速で解析を行い、定常振動応答をプロットし、測定値と比較を行ったものが、図-5 である。これによれば、時刻歴応答解析から求めた定常振動応答推定値は、若干のずれはあるものの実験での測定値をほぼ再現できていると考えられる。

4. あとがき

以上のように、二次元部分剛体模型実験によって確認した結果、この手法の推定精度は比較的良好であるが、この精度は非定常空気力の精度に依存しているため、振幅に対する非定常空気力の近似精度を高めることが重要である。これらの結果を元に、今後、二自由度バネ吊り実験の時刻歴応答推定、全橋模型実験の時刻歴応答推定、乱流中の時刻歴応答推定等を手がける予定である。この手法が完成すれば、部分模型による実験を行うことで、全橋の時刻歴応答推定も可能になるであろう。なお、本手法については特許申請を行っている。



(a) 測定時の時刻歴



(b) 推定法による時刻歴

図-4 Vr=5.76 での応答時刻歴波形の比較

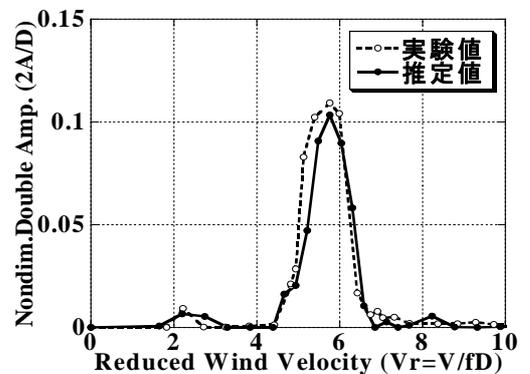


図-5 空力弾性振動応答の比較

参考文献 芝尾,久保他,部分模型実験による連続桁橋の対風応答推定法に関する研究,土木学会全国大会第 64 回年次学術講演会.