

非定常空気力の測定法に関する一考察

九州工業大学	学生員	廣中忠孝
九州工業大学	正 員	久保喜延
九州工業大学		高井芳友
九州工業大学		中村保則

1. まえがき…これまでに、橋梁断面における空力弾性振動の発振風速が風洞実験結果と実橋での測定結果とで異なるという報告が数多くある。この原因は、レイノルズ数の影響であると考えられているが、著者等はレイノルズ数以外にも原因があるのではないかと考えている。その原因の一つとして模型による風洞実験において非定常空気力を評価するときに微小な値として考慮していなかった空気の慣性力が、無視できないほど大きいのではないかとということで、実験的検討を行った。

2. 実験方法…実験では強制加振実験と自由振動実験とを行った。実験には図1に示す平板模型を用いた。強制加振実験は境界層型波浪風洞(測定部断面1800mm×1100mm)を使用し、自由振動実験は、空力弾性試験用風洞(測定部断面1070mm×1070mm)を使用した。

空気の慣性力は模型の周囲の空気が模型と共に振動することにより発生するので、模型のまわりの空気の体積を増減させるために、図2に示すようなカバーを作成した。強制加振実験において、水平な状態(迎角 0°)にした模型に、カバーを取り付けた場合と取り付けない場合の曲げ加振時のリフト成分を測定し、また振れ加振時にはモーメント成分を測定した。このときの模型とカバーの隙間間隔 d は、5, 10, 15, 20mmの4通りとした。また、曲げ加振時において、模型が垂直な状態(迎角 90°)では空気の慣性力の影響はほとんど無く、模型の慣性力のみが測定されるので、カバー無しでリフト成分の測定を行った。

自由振動実験(無風時での曲げ振動)においては、模型を垂直に立てた状態(迎角 90°)で加振を行い、減衰率、固有振動数を測定し、迎角 0° の状態でも同じように減衰率、固有振動数を測定した。

3. 実験結果と考察…強制加振実験の結果は図3～図6に示している。図3, 図4は曲げ加振時のリフト成分とその値を各振動数の自乗で割ったもので、図5, 図6は振れ振動時のモーメント成分とその値を各振動数の自乗で割ったものを示している。隙間間隔が0mmのものは模型を立てた状態の値とし(曲げ加振時のみ)、 ∞ mmのものはカバーを取り除いた状態の値としている。

曲げ加振時のリフト成分の結果である図3を見ると、どの振動数においてもカバーを取り付ける効果で値がかなり減少している。また、カバーと模型の隙間間隔を狭くするにしたがって値は減少しており、模型の慣性力に近づいていることが分かる。これはカバーを取り付けることや隙間間隔を狭くすることで模型に影響を及ぼす空気の体積が減少し、空気の慣性力が減少するためと考えられる。そこで慣性力は振動数の自

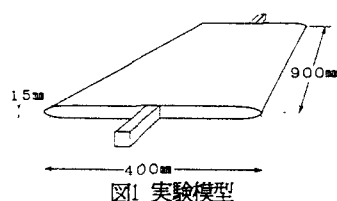


図1 実験模型

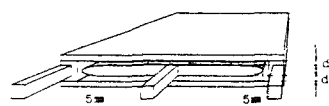


図2 カバーの概略図

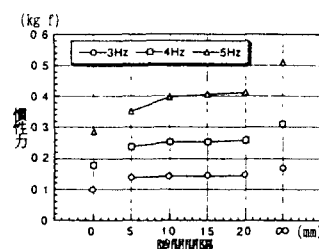


図3 隙間間隔と慣性力の関係 (曲げ振動時)

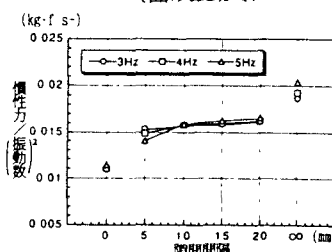


図4 隙間間隔と慣性力の関係 (曲げ振動時)

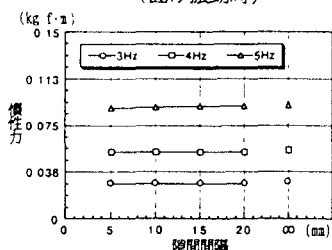


図5 隙間間隔と慣性力の関係 (振れ振動時)

乗に比例していることより、各振動数の自乗で割った図4を見ると、異なる振動数においても値はほぼ一致している。隙間間隔が5mmでの値のずれは、カバーと模型の接触などで測定に誤差が生じたためと考えられる。これらの結果より、図3、図4に見られる現象は空気の慣性力の影響であるといえる。

振れ加振時のモーメント成分の結果である図5を見ると、カバーを取り付けた状態と取り付けていない状態での値はほとんど変わらず、隙間間隔を狭くしても値の変化は現れないため、空気の慣性力はあまり影響しないものと考えられる。そこで曲げ加振時のときと同じように、各振動数の自乗で割った図6を見ると曲げ加振時のときのような一致はみられない。よって、この模型の場合、振れ加振時のモーメント成分には空気の慣性力はほとんど影響はないものといえる。

以下に、空気の慣性力を導き出す式を示している。
但し、 F_M :測定された力、 β_M :測定された位相差、 F_I :模型の慣性力、 β_I :模型の慣性力による位相差、 F_{Ia} :空気の慣性力、 β_{Ia} :空気の慣性力による位相差、 F_a :非定常空気力、 β_a :非定常空気力の位相差、 m_{Ia} :空気の慣性力に相当する付加質量、 y_0 :加振振幅

・強制加振実験 $F_M \sin(\omega t + \beta_M) = F_I \sin(\omega t + \beta_I) + F_{Ia} \sin(\omega t + \beta_{Ia}) + F_a \sin(\omega t + \beta_a)$ ①

$F_{Ia} = m_{Ia} \cdot \omega^2 \cdot y_0$ ②

①, ②より $m_{Ia} = \frac{F_M(\sin\beta_M - \cos\beta_M \tan\beta_a) - F_I(\sin\beta_I - \cos\beta_I \tan\beta_a)}{(\sin\beta_{Ia} - \cos\beta_{Ia} \tan\beta_a) \cdot \omega^2 \cdot y_0}$ ③

・自由振動実験 $m \ddot{y} + c \dot{y} + k y = 0$ ④

④より $2\xi\omega = \frac{c}{m}$, $\omega^2 = \frac{k}{m}$ ⑤

$(m + m_{Ia})\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F_a \sin(\omega_1 t + \beta_a)$ ⑥

⑥より $2\xi_1\omega_1 = \frac{1}{m_1 + m_{Ia}} (c - \frac{F_a \sin\beta_a}{\omega_1 y_0})$, $\omega_1^2 = \frac{1}{m_1 + m_{Ia}} (k - \frac{F_a \cos\beta_a}{y_0})$ ⑦

⑤, ⑦より $m_{Ia} = \frac{2\xi\omega\omega_1 m - 2\xi_1\omega_1^2 m_1 - \omega^2 m \tan\beta_a + \omega_1^2 m_1 \tan\beta_a}{(2\xi_1 - \tan\beta_a)\omega_1^2}$ ⑧

上式より必要とされる各値を実験から求め、曲げ振動時の空気の慣性力を推定した結果を図7に示す。

曲げリフト成分の非定常空気力の位相差はTheodorsenの理論値によると無風時では-90°付近になるので、図7の-90°の値を表1に示す。自由振動実験と強制加振実験の結果を比較すると、空気の慣性力は4～5倍の違いがある。これは過渡減衰振動状態と定常振動状態との違いで模型に影響する空気の体積が異なるためと考えられる。また、強制振動で振動数が高くなると空気の慣性力も大きくなっている。このことも、模型に影響する空気の体積が振動数によって異なるためと考えられる。

4. まとめ…今回の実験で以下のことが分かった。

- ・曲げ加振時のリフト成分での空気の慣性力は、模型実験では無視できないほど大きく、またその慣性力は、振動状態や振動数によって変化することが分かった。
- ・非定常空気力の測定において、空気の慣性力を考慮した測定法を考えなければならない。

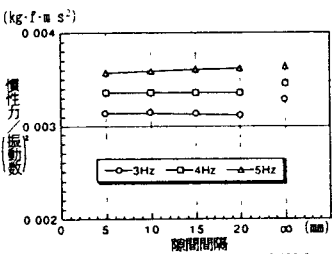


図6 隙間間隔と慣性力の関係 (振れ振動時)

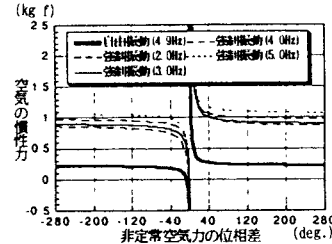


図7 非定常空気力の位相差と空気の慣性力の関係

表1 空気の慣性力 ($\beta_a = -90^\circ$ のとき)

実験方法	振動数	空気の慣性力
自由振動	4.9 (Hz)	0.203 (kg·f)
	2.0 (Hz)	0.803 (kg·f)
	3.0 (Hz)	0.864 (kg·f)
	4.0 (Hz)	0.940 (kg·f)
	5.0 (Hz)	1.025 (kg·f)