

I-13

断面辺長比4の矩形断面の動的空気特性に関する数値流体解析

八戸工業高等専門学校 学生会員 ○田高 真人
八戸工業高等専門学校 天間 祐輔
八戸工業高等専門学校 正会員 丸岡 晃

1. はじめに

橋梁構造物に風が作用すると特異な空気特性が発現することがある。この現象を解明するために様々な橋梁断面の風洞実験が行われている。本研究では数値流体解析で振動状態にある断面辺長比4の矩形断面に作用する空気力を求め、渦や振動現象を再現した。また風洞実験結果¹⁾²⁾と比較し、数値流体解析による空気特性の再現性を確認した。そして解析結果を可視化することにより動的空気特性を考察した。

2. 対象断面と空気力の定義

本研究で対象とした断面辺長比4の矩形断面を図1に示す。ここで B は桁幅、 D は桁高、 y は鉛直たわみ変位（上向きを正）、 θ はねじれ変位（頭上げを正）、 L は揚力、 M は空力モーメントを表す。この断面は幅広く風洞実験¹⁾²⁾が実施されており、渦励振、フラッターが発生しやすい断面である。

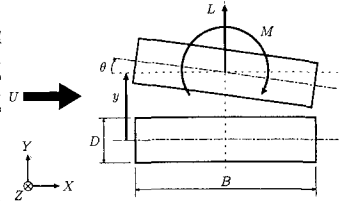


図-1 断面形状と空気力の定義

3. 解析手法と解析条件

数値流体解析は、有限要素法による解析手法の1つであるIBTD/FS法⁴⁾に乱流モデルのSA(Spalart-Allmaras)モデルを組み込んだ2次元解析コードにより行った。まず静的解析として、迎角を変化させ、静的空気力を求めた。次に動的解析として上記の解析手法にALE法を組み込み、鉛直たわみ変位 $y = y_0 \cos 2\pi f_y t$ 、ねじれ変位 $\theta = \theta_0 \cos 2\pi f_\theta t$ とした、たわみおよび、ねじれ1自由度の強制振動解析を行い、非定常空気力を求めた。フラッター解析は、次式に示すたわみおよび、ねじれ1自由度の振動方程式を複素固有値解析することで行った。

$$\ddot{y} + 2\delta_{Ny} f_{Ny} \dot{y} + 4\pi^2 f_{Ny}^2 y = \frac{\bar{L}_y}{m}, \quad \ddot{\theta} + 2\delta_{N\theta} f_{N\theta} \dot{\theta} + 4\pi^2 f_{N\theta}^2 \theta = \frac{\bar{M}_\theta}{I}$$

ここで、 δ_{Ny} , $\delta_{N\theta}$ は構造減衰率、 f_{Ny} , $f_{N\theta}$ は固有振動数、 m , I は質量と慣性モーメント、 ρ は空気密度、 $\bar{L}_y$, $\bar{M}_\theta$ は非定常空気力の対角項を表す。

数値解析条件および、フラッター解析条件は、それぞれ表1、表2に示す。

4. 解析結果と考察

(1) 静的解析

図2に静的三分力図を示す。図中の C_D は抗力係数、 C_L は揚力係数、 C_M は空力モーメント係数を表している。迎角 $\alpha = 0^\circ \sim 4^\circ$ と 10° 以上は、実験値³⁾と解析値がほぼ同一となっている。しかし $\alpha = 4^\circ$ から 10° の間は C_D , C_L において解析値が実験値を過大評価、 C_M において過小評価している。これは $\alpha = 4^\circ \sim 10^\circ$ において流れが再付着型から完全剥離型の流れへと変化する遷移状態であるが、この流れを精度よく再現できていないためであると考えられる。これを再現するためには3次元解析のLES⁴⁾など、より高精度の乱流モデルが必要となる。

0° 付近で C_L は正勾配を示しているので 0° 近傍でたわみ1自由度発散振動が発生しないことが示唆される。また、 0° 付近で C_M は負勾配を示している。これはねじれ1自由度発散振動が発現する可能性を示唆している。

ところで、動的解析では相対迎角の変化による空気力が作用する。ここで相対迎角は 0° 近傍の小さい範囲に収まる。図2より $\alpha = 4^\circ$ 以下の場合、数値解析結果は実験値とよく一致しているため、本研究では2次元解析によって動的解析を行った。ストローハル数 St は $\alpha = 0^\circ$ の揚力をスペクトル解析することにより求め、 $St = 0.131$ となった。風洞実験の値は $St = 0.13$ であることから本手法ではカルマン渦の放出振動数をよく再現している。

(2) フラッター解析

図3にたわみ（左）、ねじれ（右）の1自由度フラッター解析結果を示す。たわみの空力減衰率 δ_y は、解析範囲において常に0以上である。 $U r_y = 9.0$ のとき δ_y がほぼ0であるので、加振振幅 y_0 の定常振動状態になると考えられる。こ

表-1 数値流体解析条件

レイノルズ数 Re	50000
節点・要素数	14282, 14048
流入条件	一様流入: U
時間増分 Δt	$0.05D/U$
無次元風速 $U r_y, U r_\theta$	$1.0 \sim 20.0$
加振振幅 y_0, θ_0	$0.1D, 1.0^\circ$
解析領域 X	$-14D \sim 26D$
Y	$-12D \sim 12D$

$$\ast U r_y = \frac{U}{f_y D}, \quad U r_\theta = \frac{U}{f_\theta D}$$

表-2 フラッター解析条件

構造減衰率 $\delta_{Ny}, \delta_{N\theta}$	1%
スケルトン数 Sc_y, Sc_θ	20.0

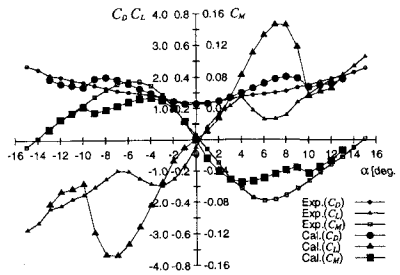
$$\ast Sc_y = \frac{2m\delta_{Ny}}{\rho D^2}, \quad Sc_\theta = \frac{2I\delta_{N\theta}}{\rho D^4}$$


図-2 静的三分力図

の時、カルマン渦放出振動数とたわみの固有振動数が一致する lock-in 状態となり、たわみの渦励振が発生すると考えられる。なお、明確な負減衰とならないのは本研究で用いたスクルートン数が大きいためである。 $Ur_y > 9.0$ で δ_θ が大きいのはストローハル数から離れているためと考えられる。静的三分力図よりたわみ 1 自由度発散振動が発現しないこと示唆されたが、フラッター解析によりたわみ 1 自由度発散振動が発生しないと確認された。

ねじれの空力減衰率 δ_θ は、 $Ur_\theta < 4.0$ において δ_θ が正である。 $Ur_\theta = 5.0, 6.0$ に負の値がみられる。これは前縁からの剥離せん断層によってねじれの渦励振が発生すると考えられる。ストローハル数に近い値となる $Ur_\theta = 7.0 \sim 8.0$ において δ_θ が正の大きい値となる。これはカルマン渦放出振動数とねじれの固有振動数が lock-in 状態 (図 4) にあり、ねじれ振動が渦の流下を促進し、励起しなくなると考えられる。 $Ur_\theta = 9.0$ の δ_θ は負、 $Ur_\theta = 10.0 \sim 15.0$ の δ_θ は正の小さい値となる。より小さいスクルートン数を用いれば負になることも考えられる。 $Ur_\theta > 16.0$ となると δ_θ が負となり、ねじれ 1 自由度発散振動になると考えられる。

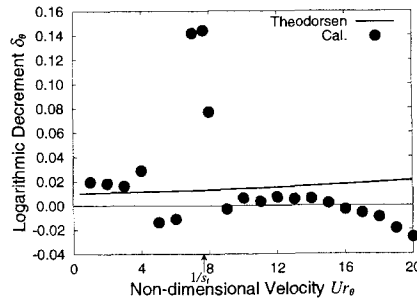
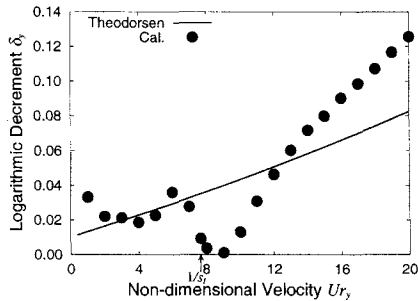


図-3 たわみ (左) およびねじれ (右) 1 自由度フラッター解析結果

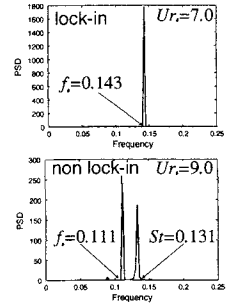


図-4 スペクトル解析結果

(3) 流れ場と空気力の関係

図 5 にたわみとねじれの渦励振が発生すると予測される流れの渦度の強度・圧力コンターと空気力・変位関係を示す。流れ場は、変位が 0 で負から正へと変化する速度が最大の状態であり、このとき空気力は正となっている。速度と空気力が同一方向であることより振動が励起すると考えられる。

たわみの場合、前縁上部から剥離せん断層が発達し、後縁上部に発生するカルマン渦と結合する。この結合した渦の影響によって上部全体の圧力が減少する。前縁下部では剥離せん断層が発達し、圧力は低くなるが後縁下部では再付着することから圧力上昇が確認できる。以上より上下部の圧力差が生じて正の揚力が発生したと考えられる。ねじれの場合、断面前縁上下部から剥離せん断層が発達している。その剥離せん断層が後縁上部で再付着、下部では渦を巻き込み、一部は剥離泡として流下している様子が確認できる。後縁上部では再付着による圧力上昇、下部では渦の流下による圧力低下の状態にある。以上の圧力差により正の空力モーメントが発生したと考えられる。また、剥離せん断層の再付着点位置は交互に移動し、それに伴う圧力変化から渦励振が発生すると考えられる。

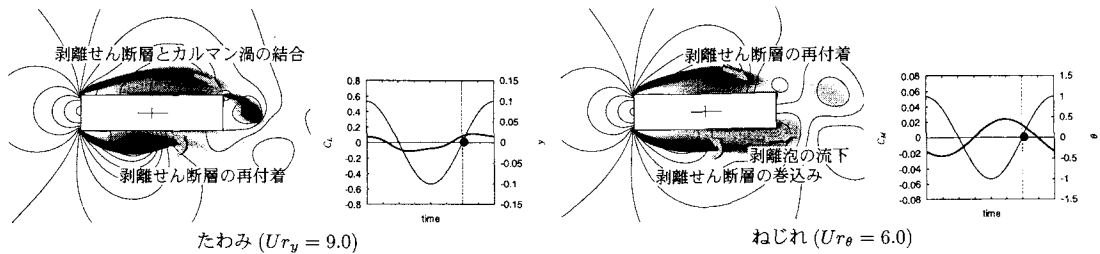


図-5 流れの渦度の強度・圧力コンターと空気力・変位関係

5. 結論

本研究では $B/D = 4$ の矩形断面を対象に、数値流体解析によって動的空気特性の考察を行った。その結果、フラッター解析より、 $Ur_y = 9.0$ に加振振幅 y_0 による定常振動の発現、 $Ur_\theta = 6.0$ にねじれの空力減衰率 δ_θ が負になることを確認した。また流れ場と空気力の関係より、 $Ur_y = 9.0$ で流れ場の前縁の剥離せん断層と後縁のカルマン渦の結合、 $Ur_\theta = 6.0$ で剥離せん断層の再付着点位置が交互に移動することを確認した。

参考文献

- 1) 松本, 坪田, 白土, 八木, 玉置, 李: 矩形断面の空力干渉に関する研究, 土木学会第 59 回年次学術講演会概要集, pp.1275-1276, 2004
- 2) 松本, 水野, 白土, 大窪, 足田: 構造基本断面の低風速域に着目した非定常空気力特性, 土木学会第 59 回年次学術講演会概要集, pp.1301-1302, 2004
- 3) 平野, 渡邊, 丸岡: 矩形断面 (断面辺長比 1:4) の迎角変化にともなう空気力特性に関する数値流体解析, 計算工学講演会論文集 (vol.6), 2001
- 4) 丸岡, 太田, 平野, 川原: 同次補間を用いた陰的有限要素法による非圧縮粘性流れの解析, 構造工学論文集, pp.383-394, 1997