

中央大学 学生員 大佐 嘉彦 八戸高専 正会員 丸岡 晃
中央大学 正会員 平野 廣和 中央大学 正会員 佐藤 尚次

1. はじめに

長大橋梁に用いられることが多い比較的偏平な箱型断面は、基本的に流れに対して鈍い形状であるため、耐風工学的には、その形状・振動特性等によって各種の問題を発生させることがある。その一例として、高風速域における連成フラッターの発生が挙げられる。橋梁設計においてフラッター現象は、橋梁全体を破壊に導く恐れのある発散振動であり、発生の一歩を許されない現象である。ところで、発散振動であるフラッター現象は、物体周りの流れの変化がその特性を左右することが多い。そのため橋梁の耐風安定性の検討に際して、まず最も基礎的なデータとである偏平矩形断面の静的空気力や非定常空気力が扱われる。最近では、この検討に風洞実験ばかりでなく数値流体解析(CFD)¹⁾を行う試みもされている。一方、物体に作用する非定常空気力は、非定常空気力係数によって評価される方法がある。この非定常空気力係数は、振幅依存性を考慮していないことから、振幅依存性がないという仮定で表されている。しかし、宇都宮ら²⁾の風洞実験によると超偏平な矩形断面において高風速域側で振幅依存性が生じる事が指摘されている。よって、本報では3次元数値流体解析によりまず静的空気力係数を、次に非定常空気力係数を算出して風洞実験結果²⁾で指摘されている振幅依存性について数値流体解析の面から確認する事を目的としている。

2. 解析手法

本報では、比較的高いレイノルズ数領域での Bluff な断面まわりの流れを扱うため、剥離・再付着の現象を忠実に再現できることが必要である。また、空気力の算出に直接起因する物体表面の変動圧力をより正確に求めることも必要になる。Navier-Stokes 方程式を基礎方程式とし、乱流には平均量・変動量とも風洞実験とよく対応する解が得られることが知られている LES における SGS モデルを採用した。解析手法には、著者らが従来より提案している有限要素法による IBTD/FS 法³⁾を用いた。また、動的問

題の解析手法では、解析領域全体を剛体的に移動させる手法⁴⁾を採用している。

3. 解析モデル

解析モデルには風洞実験²⁾と同じ断面辺長比 $B/D=150$ の超偏平矩形断面を用いる。軸方向長さ $0.64B$ を 32 分割にして 3 次元数値流体解析を行う。静的解析での仰角は風洞実験の仰角 ($-12.2^\circ \sim 12.2^\circ$) に加えてより大きな仰角 ($-16^\circ \sim 16^\circ$) まで解析を実施した。解析パラメータを表 1 に示す。

表 1 解析パラメータ

Reynolds数	$Re=1.0 \times 10^5$
時間増分	$\Delta t=0.005B/U$
流入条件	一様流入(流入速度:U)
Smagorinsky定数	0.1
軸方向分割幅	0.02B
解析領域	$x=-9B \sim +9B$ $y=-8B \sim +8B$

4. 静的解析

静的空気力解析では、以下に示す静的空気力係数(抗力係数 C_D 、揚力係数 C_L 、空力モーメント係数 C_M)を用いて静的空気力特性の評価を行った。

$$C_D = \frac{f_x}{\frac{1}{2}\rho U^2 DL} \quad C_L = \frac{f_y}{\frac{1}{2}\rho U^2 BL} \quad C_M = \frac{f_M}{\frac{1}{2}\rho U^2 B^2 L}$$

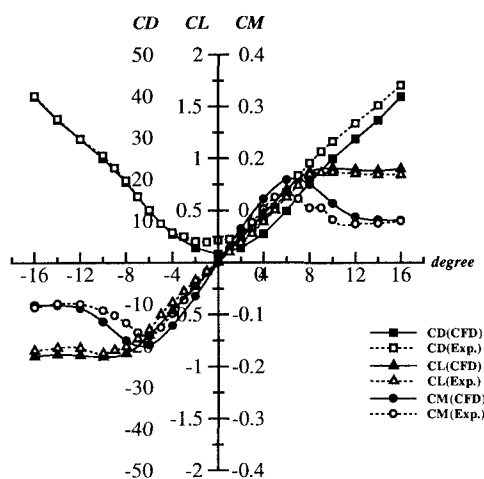


図 1 静的空気力係数

ここで f_x 、 f_y 、 f_m はそれぞれ抗力、揚力、空力モーメントであり、 ρ は空気密度、 L はスパン長である。図 1 に示す静的空気力係数は、流れが安定した状態での時間平均によって表されている。風洞実験の結果と比較すると空力モーメント係数が実験値より若干大きな値ではあるものの仰角 6° 付近の極大値と負勾配を再現できている。よって数値解析でも風洞実験とほぼ同等の結果を得られることができた。

5. 動的解析

1 自由度のねじれフラッターは、前縁で形成される振動数成分の渦に沿っての流下過程と回転変位との位相差および渦形成に伴う剥離流の側面への再付着等により、断面に時間的に変化する非対称の圧力分布が形成され、ねじれモーメントが誘発されることにより生じる。ところで、風洞実験²⁾によると曲げ強制振動による振幅依存性は確認されず、ねじれ強制振動のみにおいて振幅依存性が確認されている。この結果から本報では 1 自由度のねじれ強制振動に絞っての解析を行った。なお、ねじれ振幅は静的解析と同様、 $-16^\circ \sim 16^\circ$ の範囲で実施した。

1 自由度のねじれ振幅の振動時における非定常揚力 L と非定常空力モーメント M は非定常空気力係数を用いて次式のように表される。

$$L = \frac{1}{2} \rho (2b) U^2 \left(k H_2^* \frac{b \dot{\phi}}{U} + k^2 H_3^* \phi \right)$$

$$M = \frac{1}{2} \rho (2b^2) U^2 \left(k A_2^* \frac{b \dot{\phi}}{U} + k^2 A_3^* \phi \right)$$

ここに、 b は断面の半桁幅、 k は換算振動数である。

非定常空気力係数の特性として橋梁断面のフラッターの安定性に大きな関わりを持つのは、 A_2^* と H_3^* である。 A_2^* はねじれモードの空力振動の不安定性を支配するねじれ速度に比例する空力減衰係数であり、この値が負であるとき安定となる。風洞実験と同じように算出された非定常空気力係数のうち強制振動の変化に対して変化が認められた A_2^* を図 2 に示す。ここで、縦軸は非定常空気力係数 A_2^* 、横軸は換算風速を示している。

この結果より、解析と風洞実験のどちらも大振幅の高風速域で A_2^* は負から正に転じており不安定領域にある。また、加振振幅が大きくなるにつれて A_2^* の値が負から正に転じる換算風速が小さくなっていることが判る。そして振幅の大きさに関わらず、高

風速域では理論値との差が生じている。なお、振幅が大きくなるにつれて両者の差が大きくなりセオドルセン理論の適用が難しくなるのが判る。

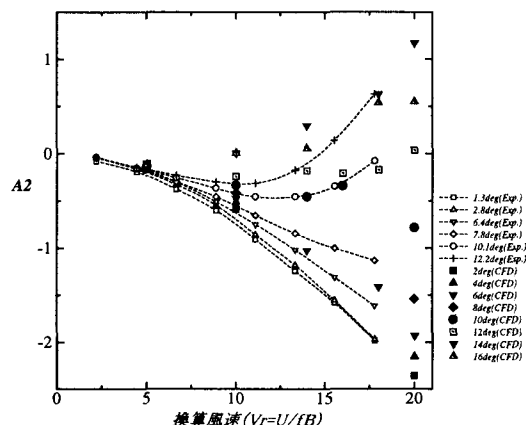


図2 ねじれ1自由度強制振動による非定常空気力係数 A_2^*

風洞実験と解析を比較すると、どちらもねじれ振幅 12° で A_2^* の値が負から正に転じるが、振幅が大きくなるに伴い高風速域で差異が大きくなる。そして実験値の方が解析値に比べて振幅依存性の影響が大きくなっている。この起因として非定常空気力の計測点による違いが考えられる。風洞実験の計測点がよどみ点であるのに対して、解析では断面の中心点からの算出を行っている。今回のような超偏平な矩形断面において計測点の違いの影響が考えられる。

6. おわりに

解析結果は風洞実験の結果同様、ねじれ振幅による非定常空気力係数の振幅依存性を認めることができた。従って、今後の長大橋の設計において従来の考え方では耐風安定性に問題が生じる可能性があるため耐風設計にこの振幅依存性を考慮する必要があると考えられる。最後に、貴重な風洞実験データを提案してくれた徳島大学 野田氏に感謝の意を表す。

<参考文献>

- 1) 丸岡他：数値流体解析による非定常空気力の算出について，土木学会応用力学論文集，Vol.3, pp.707-714, 2000.8
- 2) 宇都宮他：扁平矩形断面における非定常空気力係数の振幅依存性，土木学会第 56 回年次学術講演会，I-B355, pp710-711, 2001.10
- 3) 丸岡他：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，土木学会構造工学論文集・Vol.43A, pp383-394, 1997.3