

非定常空気力係数に着目した長大橋梁の耐風設計への CFD の活用の検討

清水建設 正会員 ○伊藤 靖晃

Imperial College London 非会員 J. Michael R. Graham

1. はじめに 建築分野においては風荷重評価への CFD の活用が建築物荷重指針に明記されるなど、その役割は風洞実験と同等程度まで向上しつつある。一方、長大橋の耐風設計においては、空力振動など風荷重評価に留まらない検討が必要となることなどから、CFD の活用が十分に進んでいるとは言えない。しかしながら、計算機能力は急速に向上しており、将来的には長大橋の耐風設計においても CFD の活用が期待されることから、CFD による空力振動評価手法やその精度について検討を行っておくことは有用である。本研究では、まず、振動時に作用する非定常空気力を適切に算出することを目的に、箱桁橋梁の非定常空気力係数を LES によって算出し、既往の実験結果と比較することにより、解析手法の妥当性と評価精度について検討を行う。

2. 解析手法および解析対象 支配方程式は時間を含めた 4 次元の座標 (x,y,z,t) に対して座標変換を行った一般座標系における非圧縮性の Navier-Stokes 方程式および連続式である。時間発展には fractional step 法を用い、対流項に 2 次精度の Adams-Bashforth 法、粘性項に 2 次精度の Crank-Nicolson 法を用いた。対流項を除く全ての差分は 2 次精度中心差分とし、対流項は森西の手法¹⁾を用いた。また、数値振動を抑制するため、微小な数値粘性を導入した。ヤ

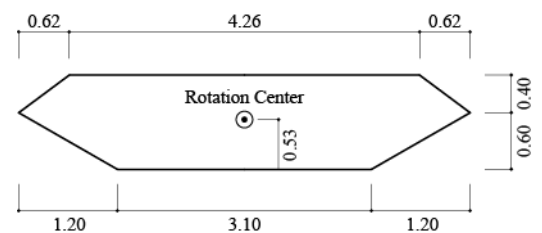


図 1：解析対象の箱桁断面

コビアンは、各時間ステップで Geometric Conservation Law を満足するように算出した。乱流モデルは標準 Smagorinsky モデル($C_s=0.12$)とし、壁面近傍は Van Driest の減衰関数を用いた。

解析対象は Šarkić et al.²⁾の研究で用いられた図 1 に示す箱桁断面であり、解析格子は O 型の構造格子、解析領域は主流および鉛直方向に $63D$ 、スパン方向に $1D$ (D : 桁高)である。壁面の第一格子点の壁面直交方向のサイズは $D/250$ とした。物理量はコロケート配置とし、格子点数は周方向に 421 点、半径方向に 264 点、スパン方向に 21 点である。流入境界条件は一様流、流出境界は対流流出条件、壁面はすべり無し条件とし、圧力境界条件はいずれも Neumann 型境界条件とした。箱桁を鉛直たわみ、およびねじれの各 1 自由度で調和振動させることにより非定常空気力を測定した。加振振幅は、相対迎角の倍振幅が 4.0 度となるように設定した。無次元風速($Vr=U/fB$, U : 平均風速, f : 加振周波数, B : 幅員)は、加振周波数を変更することにより、 $3.64 \sim 29.1$ の範囲で 3.64 毎に設定した。レイノルズ数は $20,000$ とし、いずれのケースでも 100 無次元時間(Ut/D)の助走計算の後、 15 周期に相当する無次元時間を評価時間とした。

非定常空気力係数は Scanlan&Tomko³⁾の定義に基づいて次式のように設定した。

$$L_{ae} = \frac{1}{2} \rho U^2 B L \left[K H_1^* \frac{\dot{\eta}}{U} + K H_2^* \frac{B \dot{\phi}}{U} + K^2 H_3^* \phi + K^2 H_4^* \frac{\eta}{B} \right], \quad M_{ae} = \frac{1}{2} \rho U^2 B^2 L \left[K A_1^* \frac{\dot{\eta}}{U} + K A_2^* \frac{B \dot{\phi}}{U} + K^2 A_3^* \phi + K^2 A_4^* \frac{\eta}{B} \right] \quad (1)$$

ここで、 ρ : 空気密度, L : スパン長, $K=B\omega/U$: 換算振動数, ω : 円振動数, η : 鉛直たわみ変位, ϕ : ねじれ変位である。非定常揚力およびたわみ変位は下向き正、非定常モーメントおよびねじれ変位は頭上げ正とした。

3. 解析結果 本研究で算出したねじれ加振により算出される非定常空気力係数(以下、ねじれ系の非定常空気力係数)と、既往の実験および URANS を用いた解析結果²⁾との比較を図 2 に示す。既往の URANS を用いた解析では実験結果と概ね一致する傾向は見られるものの、 A_2^* や H_2^* など変位と空気力間の位相差に敏感な空気力係数では有意な差異が確認できる。特に A_2^* はフラッター発現風速の評価に大きな影響を与える⁴⁾ため、改善の必要があると言える。一方、LES を用いた本研究の解析では、 A_2^* を含む全ての非定常空気力係数を適切に評価している。LES と URANS の差異は位相差に敏感な空気力係数のみに表れていることから、URANS

キーワード CFD, Large Eddy Simulation, 非定常空気力係数, 箱桁, 長大橋梁

連絡先 〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 清水建設(株) 技術研究所 環境基盤技術センター TEL 03-3820-5523

と LES では変位と空気力間の位相の評価に有意な差異が生じると考えられるが、詳細な原因については今後の検討課題である。

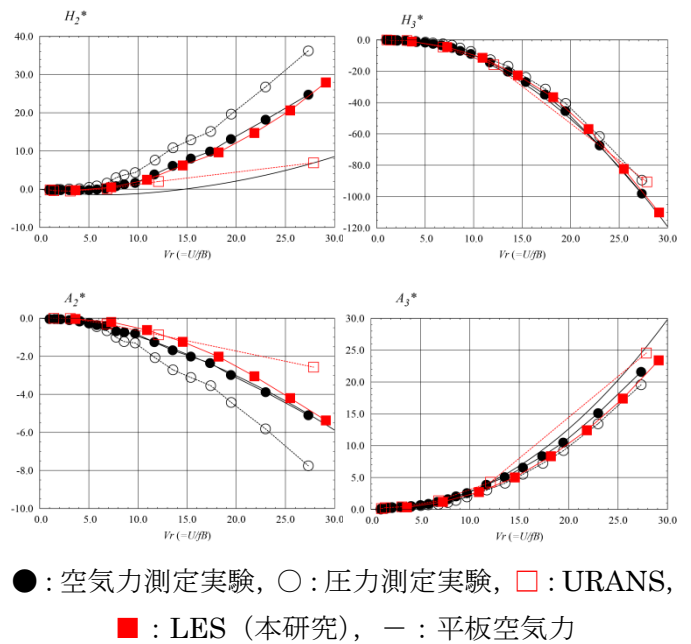
鉛直たわみ加振により算出される非定常空気力係数（以下、たわみ系の非定常空気力係数）の解析結果と実験結果の比較を図3に示す。概ね実験結果と一致する傾向を示すものの、 $Fr=20$ 以上の高風速域において実験結果とやや差異が生じることが確認された。佐藤ら⁵⁾の研究などを参考とすれば、箱桁断面の非定常空気力係数は平板空気力と類似した傾向を示すことが妥当であると考えられ、実際、本研究で対象とした既往の実験結果についても、ねじれ系の非定常空気力係数は平板空気力と同様の傾向を示している。一方、たわみ系の非定常空気力係数では高風速域において H_1^* , H_4^* が一定値に漸近する傾向を示すなど、佐藤らの研究やねじれ系の非定常空気力係数と異なる傾向を示している。詳細な原因については検討の必要があるものの、実験におけるたわみ系の相対迎角がねじれ系と比較して小さいことや実験気流が3%の乱れを有することなどが影響を与えた可能性が考えられる。このため、特に高風速域におけるたわみ系の非定常空気力係数については、実験結果と直接の比較を行うことは困難である。そこで、Matsumoto⁴⁾が提案する非定常空気力係数間の従属性を用いて、ねじれ系の非定常空気力係数から算出した非定常空気力係数を図3に示し、解析結果との比較を行った。従属性を用いて算出した非定常空気力係数と LES 解析の結果は極めて良く一致しており、本研究で用いた解析手法により、いずれの非定常空気力係数も実験と同等の精度で算出可能であることが確認された。なお、比較的短いスパン方向解析領域を用いた本研究の解析結果が実験結果と良く一致していること、別途実施したスパン方向解析領域を20倍大きくしたケースでも解析結果がほぼ同じとなることから、スパン方向解析領域が非定常空気力係数の評価に与える影響は小さいと考えられる。

4. 結論 本研究で得られた結論および今後の課題は下記の通りである。

- ・本研究で用いた解析手法により、箱桁断面の非定常空気力係数を実験と同等の精度で算出することができる。
- ・箱桁断面では、スパン方向解析領域が非定常空気力係数の評価に与える影響は小さい。

今後、渦励振による応答振幅やフラッター発現風速評価への CFD の活用について検討を行う予定である。

参考文献 1) 森西洋平: 非圧縮性流体解析における差分スキームの保存特性: 第2報, 日本機械学会論文集B編, vol.62, 1996. 2) Šarkić et al.: Bridge flutter derivatives based on computed, validated pressure fields, JWEIA, Vol. 104-106, 2012. 3) Scanlan, R.H., Tomko, J.J.: Airfoil and Bridge Deck Flutter Derivatives, JEMD, No. EM 6, 1971. 4) Matsumoto, M.: Aerodynamic damping of prisms, JWEI, vol. 59, 1996. 5) 佐藤ほか: 開口部を有する偏平箱桁の非定常空気力特性に関する考察, 構造工学論文集, vol. 44, 1998.



(実験および URANS の結果は文献 2 より)

図 2 : ねじれ系の非定常空気力係数の実験結果と解析結果の比較

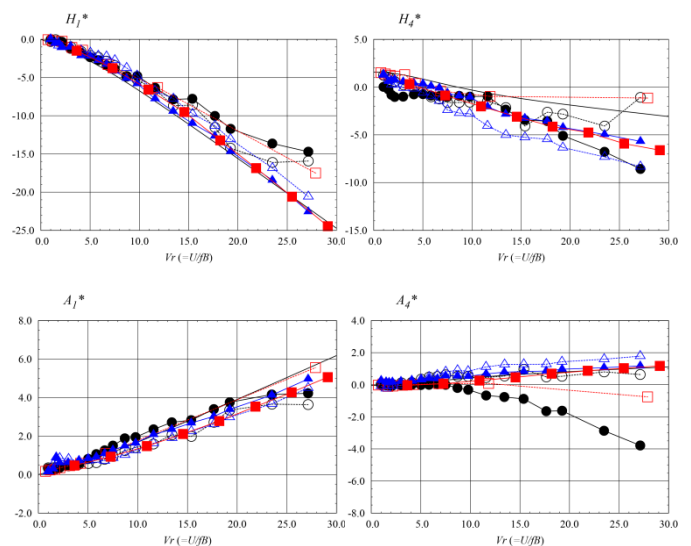


図 3 : たわみ系の非定常空気力係数の実験結果と解析結果の比較