特集

橋梁分野における CFD 技術の利用と展望

数値流体解析による橋梁断面の空気力評価と振動予測

Aerodynamic force and vibration prediction of cross section bridge using CFD

平野廣和*

Hirokazu HIRANO

1. はじめに

風工学の分野，とりわけ土木構造物の分野での数値流体解析(CFD: Computational Fluid Dynamics)への取り組みは，1986年に土木学会構造工学委員会「耐風設計研究小委員会」の下部組織に「耐風工学数値実験分科会(主査:岡島厚金沢大教授(当時))」¹⁾が発足し，組織的な調査・活動を開始したことによる．続いて1990年に土木学会構造工学委員会に「風工学における数値計算の応用と評価研究小委員会」(初代委員長:野村卓史日大教授，二代目委員長:著者)^{2),3)}として，2000年から風洞実験とCFDとの相互を相補うことを目的として，同委員会に「風工学における数値解析と風洞実験の相互利用に関する研究小委員会」(委員長:白土博通京大助教授(当時))⁴⁾が設置され，主として橋梁本体あるいはその構造要素の風荷重や耐風応答，流れの現象や物体の空力性能の評価を実施することを目的として研究・開発が進められてきた．特にこの分野では，風洞実験が従来から中心的な役割を果たしてきた領域であるので，いわゆる「数値風洞」を目指してきたことになり，以来33年余りの歴史の中で着実に成果を挙げるに至っている．この結果，静的な空気力のみならず，大規模な3次元数値流体解析により振動構造物に作用する空気力(以下，非定常空気力とする)までも解析することが試みられ，フラッターなどの空力不安定現象の評価等の重要な検討にも使われるようになって来た．このため現在ではCFDが，風洞実験から全面的に置き換わることはないまでも，風洞実験のある部分を置き換え，また風洞実験を相補う形で利用される様になってきていると言っても過言ではない．

ところで，最近の話題として建設コスト削減という社会的な要請が求められている．この中で，橋梁構造物でも製作の省力化を考慮した合理化形式が増加している．その結果として今までは，耐風性検討の必要が無いと考えられてきた橋梁形式においても耐風性検討が必要となって来た．机上での耐風性の検討のみならずの風洞実験も行なわれ，これにより耐風設計上の新たな見地が得られるようになってきている．また，橋梁構造物自身の耐風安定性のみならず，利用者や風環境に及ぼす風の影響もこれからの設計には必要不可欠な要素となっている．このようなことから，橋梁構造物の耐風安定性の必要性は，今後も形を変えながらも続いて行くだらう．

一方，耐風安定性を必要とする設計が多様化する中で，さらなるコスト削減は至上命題であり，風洞実験と比較してのコストパフォーマンスに優れた耐風安定性の検討手段としてCFDへの期待が高まっている．この背景には，ハードウェア環境からは計算コストの大幅な低価格化，特に計算機性能の大幅な向上が挙げられる．現在では20世紀末の超大型スーパーコンピュータと同等あるいはそれ以上の能力を有するコンピュータが，十数万円程度で手に入る時代となっている．さらにソフトウェアの面では，各種の流体汎用解析ソフト(商用コード)の充実が挙げられる．さらに，OpenFOAM⁵⁾に代表されるオープンソースプログラムで提供されているプラットフォームの出現により，商用のソフトウェアに比肩するシミュレーションが可能となっている．これにより，数値流体解析の専門家だけでなく風工学を専門とする研究者や技術者にも広くCFD

* 中央大学 総合政策学部 教授
Prof., Faculty of Policy Studies, Chuo University

が受け入れられる環境が整って来ている。

これを裏付けることとして建築分野においては、2015年に発行された建築物荷重指針⁶⁾に風荷重評価へのCFDの活用が明記されるなど、その役割は風洞実験と同等程度まで向上しつつある⁷⁾。よって、土木分野においてもCFDの耐風設計への活用が広がることが期待される。このためには、空気力や非定常空気力さらには空力振動の応答評価において、風洞実験と同等の精度の確保がCFDにとって必要不可欠となって来ている。

このような背景から、CFDが橋梁構造物の耐風設計実務に広く取り入れられるためには、高い精度で橋梁断面に作用する空気力特性が容易に解析可能な数値解析手法を示していくことが必要である。よって本報では、出野ら⁸⁾が中央径間2000mを超える超長大橋を想定した二箱桁断面を対象として行った風洞実験と同様の断面形状を取り上げ、高欄や検査車レールなどの付加物の設置位置ならびに形状の違いによる耐風安定性の変化を検討し、数値流体解析による橋梁断面の空気力評価と振動予測に関して説明するものである。

2. 空気力の評価

橋梁断面を対象とした空気力の評価に関しては、比較する風洞実験が部分模型を用いた2次元断面であることが多いので、2次元解析が中心になって行われてきた。その背景には簡単に計算ができるだけではなく、当時の計算機の能力不足もあったことも否定できない。しかし、2次元解析は文献^{9) 10)}にも示されている通り、時間平均的には流れの2次元性が保たれていても、時々刻々と変化する流れの成分が3次元性を示しているもので、橋軸方向（スパン方向）のエネルギー散逸が考慮されていない。そのため剥離渦が強めに評価され、剥離流の再付着点がずれることが生ずる。その結果、空気力が過大または過小に評価されることから、2次元解析では風洞実験結果を再現するには至っていない。

この問題を解決する一つの手法として、黒田¹¹⁾や嶋田ら^{12),13)}は、RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes)モデル手法を使い、2次元解析で非定常空気力を算出することを行っている。しかしこれらの研究は、後流に比較的大きな渦であるカルマン渦列が形成されるBluffな断面を対象としており、断面辺長比 $B/D=2$ 程度の矩形断面には適用可能である。しかし、橋梁断面の様に前縁や後縁での剥離や小さな渦が耐風安定性に影響を

与える問題では、高風速側で風洞実験値との差が大きくなるなどの傾向が見られるため、適用が難しくなると考える。よって、RANSによる橋梁桁断面の空気力評価と振動予測評価の精度は未だ解決すべき課題を有している。

解析精度向上のためには、RANSと比較して非定常な細かな渦まで再現可能なLES (Large Eddy Simulation)の活用がなされている。著者らの研究グループ¹⁴⁾では、LESを用いて平板翼の非定常空気力係数を算出し、Theodorsen¹⁵⁾による理論値と同等の結果が得られることを示している。また、石原ら¹⁶⁾はLESを橋梁桁断面に適用し、非定常空気力係数が扁平矩形断面に近い性質を示すことを示している。最近の研究として伊藤ら¹⁷⁾は、長大橋梁の耐風設計におけるCFD活用のため、高欄等の付属物が無い状態での箱桁橋梁断面の非定常空気力係数に関し、風洞試験との同等の精度を示している。併せてスパン方向の解析領域の検討も行っている。

よって、信頼性ならびに詳細な精度の評価がこれからのCFD課題となっている。ここで、橋梁断面を扱う解析における目標は、まず色々な迎角（風の傾斜角）で静的空気力とストローハル数が正しく求めることができることである。これは、流れが断面の隅角部から剥離して断面上に再付着する一連の現象を正確に捉えることができることを意味している。さらに、静的な空気力と流れの場を正確に求めることができるならば、断面を強制加振した時に求められる非定常空気力も正しく求めることができるとの概念の上に立脚している。

このような背景から、著者らの研究グループ^{10),18)}では、乱流モデルとして基礎方程式にLESにおけるSGS (Smagorinsky Sub-grid Scale)モデルによる空間的なFiltering操作を施した非圧縮粘性3次元Navier-Stokes方程式を採用し、有限要素法にて解析を行っている。

3. 付加物を有する二箱桁断面橋梁空気力

3.1 断面の特徴

超長大橋の検討において、経済性・耐風性に優れる桁断面として矩形断面を並列させ、両端にフェアリングあるいは開口部にセンターバリアを付加した二箱桁断面が提案されている。また、長大・超長大橋の耐風安定性断面の開発には、フラッター性能の向上が必要不可欠な課題である。フラッターとは、発散型現象であり直接構造物の破壊につながる現象である。これま

で、橋梁断面の形状や付加物の決定には、風洞実験や数値流体解析(CFD)による検討が行われており、一箱桁橋の静的空気力係数や非定常空気力係数は、概ね実験値と整合した CFD 結果が報告されている^{17), 19)}。しかし、二箱桁断面においては、流れの干渉により複雑な流れ場となることから、風洞実験結果と CFD が一致しない場合が報告されている。このため、空力特性に与える影響に関しては、十分な検討と現象の解明が必要であると指摘されている¹⁰⁾。

そこで、本報では高欄や検査車レールなどを付加した実橋梁に近いモデルにおいて 3 次元数値流体解析を行う。具体的には、まず静的空気力を求めることで付加物の違いによる流れ場を把握する。次に静的空気力の結果を用いて非定常空気力解析、フラッター解析を行うことで振動の発生原因の特定や耐風性能の向上要因を明らかにするとともに、二箱桁断面橋梁でのフラッター発現風速を予測することを述べるものである。

3.2 フェアリング・センターバリア付き二箱桁断面

図-1 に本報で用いる 5 種類の断面と高欄の形状を示す。各断面は、 $B/D=4$ (B :桁幅、 D :桁高)と開口部幅 $4D$ を組合せた箱桁断面にフェアリング、センターバリアを付加した断面である。これを基本断面とする。断面①は基本断面に加えて検査車レールを断面外側から $1D$ の位置に設置、高欄 a を外側に付加した断面である。断面②は検査車レールを断面外側から $2D$ の位置に設置、高欄 a を外側に付加した断面である。断面③は検査車レールを断面外側から $3D$ の位置に設置、高欄 a を外側付加した断面である。断面④は検査車レールを断面①と同様に断面外側から $1D$ の位置に設置、高欄 b を外側に設置した断面である。断面⑤は断面④に加えて、高欄 b を断面の内側と外側に設置した断面である。

3.3 高欄・検査車レール等の付加物のモデル化

橋梁断面への付加物の一つである高欄のモデル化には、出野ら⁸⁾の風洞実験を参考とする。図-1 に示すように高欄の高さは共に $0.38D$ とし、高欄 a は上下方向に 3 本の矩形柱で構成、高欄 b は上下方向に 2 本の矩形柱で構成する。ここでの高欄の充実率は高欄 a を 58%、高欄 b を 53% 程度確保するように組み合わせて再現している。また、高欄の形状によって断面上面での剥離点の位置が変化しないように、設置位置および

断面① (高欄 a, 検査車レール 1D)

断面② (高欄 a, 検査車レール 2D)

断面③ (高欄 a, 検査車レール 3D)

断面④ (高欄 b, 検査車レール 1D)

断面⑤ (高欄 b 2 か所, 検査車レール 1D)

高欄 a (充実率 58%) 高欄 b (充実率 53%)

図-1 フェアリング・センターバリア付き
二箱桁断面橋梁と高欄

高欄頂点の形状に注意してモデル化を行っている。なお、高欄や検査車レールで流れの剥離を正確に再現するために、剥離点近傍での最小要素幅は $0.0005D$ とし、断面近傍に近づくほど細くなるように設定している。

これにより、高欄の形状及び充実率によって断面の空力特性が変化することも同時に確認する。検査車レールの寸法に関しても前述の風洞実験⁹⁾と同様の矩形柱でモデル化を行なう。

3.4 解析条件

表-1 に解析諸元、図-2 に解析領域と図-3 に断面①周辺の詳細の要素分割図をそれぞれ示す。境界条件は、 Γ_1 で無次元流速である一様流速 1.0, Γ_2 では移流境界条件とする。また、 Γ_3 で slip, Γ_4 で no-slip 条件とし、断面軸方向の境界 Γ_5 では周期境界条件を用いている。解析領域は奥行き方向の軸方向長さを 3.2D とし、軸方向分割を 32 として軸方向幅を 0.1D としている。迎角は、頭上げをプラス方向とし、 $\alpha=0.0^\circ$ を中心に $-8.0^\circ \sim +8.0^\circ$ の間を迎角 1.0° ピッチで行う。なお、軸方向の分割に関しては、著者らの研究グループの解析実績^{10), 14)}から必要最小限の領域を確保している。

3.5 静的空気力

図-4 に各断面の静的空気力係数を示す。図-4(a)の抗力係数 (C_d) に着目すると断面②, ③は断面①に比べて迎角変化に伴う抗力係数が低く抑えている。ここから、検査車レールが断面の内側にある方が抗力低減効果のある断面であるとわかる。さらに、図-4(b)の揚力係数 (C_l) に着目すると、全断面において迎角変化に伴う勾配が正勾配であることから、たわみ振動現象発生の可能性は低いと考えられる。一方、図-4(c)のピッチングモーメント係数 (C_m) に着目すると、断面①は迎角 $\alpha=5^\circ \sim 6^\circ$ で迎角変化に伴う勾配が正勾配から負勾配に変化していることから、検査車レールを外側に設置した断面では、高迎角時でねじれ振動現象発生の可能性が考えられる。

高欄の形状と設置位置による空気力の違いを把握するため断面①, ④, ⑤に着目する。図-4(a)の抗力係数では、断面④, ⑤の値は断面①と同様に迎角を増加させると抗力係数が増加する傾向が得られており、値も

表-1 二箱桁断面の解析諸元

断面形状	断面①	断面②	断面③	断面④	断面⑤
時間増分 Δt	0.02D/U	0.02D/U	0.02D/U	0.02D/U	0.02D/U
最小要素幅	0.0005D	0.0005D	0.0005D	0.0005D	0.0005D
総接点数	32330×33	30722×33	32330×33	48661×33	58709×33
総要素数	31752×32	30168×32	31752×32	48000×32	57900×32
Reynolds数 Re	3.0×10^4				
軸方向長さ	3.2D				
軸方向分割	32				
軸方向幅	0.1D				
モデル定数 Cs	0.1

図-2 解析領域

図-3 断面①詳細要素分割図

図-4 空気力係数

ほぼ同様である。図-4(c)のピッチングモーメント係数では、断面④、⑤ともに迎角変化に伴う勾配が断面①に比べて低く抑えられていることが確認できることから、高欄の開口率を上げたことでねじれ振動現象発生を抑制していると考えられる。また、高欄を断面内側に設置した断面⑤は、断面①、④と比べて迎角変化に伴う勾配が低く抑えられている。このことから、高欄を断面内側に付加することで、開口部に入り込む風を抑制していると考えられ、それがピッチングモーメント抑制に作用したと思われる。次に断面④、⑤の迎角 $\alpha=5^\circ \sim 6^\circ$ に着目すると、断面①で見られた負勾配は確認されなかった。しかしながら、断面④、断面⑤においても負勾配を示している点があることから、検査車レールを外側に付加した断面では迎角が変わることによって流れの特性が変化する点が存在すると考えられる。

4. 付加物を有する二箱桁断面橋梁のフラッター特性

4.1 振動構造物に作用する空気力

静的空気力結果から正確な流れ場を再現できたと考えられる。そこで振動状態に関する流れ場を把握するために、1 自由度たわみ・ねじれ強制加振動的解析を行う。ここで強制加振は、たわみ片振幅 $\eta_0=0.1D$ 、ねじれ片振幅 $\phi_0=1.0^\circ$ とし、風洞実験値⁸⁾と同様の値に設定する。

たわみ・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、8個の非定常空気力係数を用いて式(1),(2)のように表される。

$$m(\ddot{\eta} + 2\xi_{\eta 0}\omega_{\eta 0}\dot{\eta} + \omega_{\eta 0}^2\eta) = L = \pi\rho B^2\omega^2\left(C_{L\eta R}\eta + C_{L\eta I}\frac{\dot{\eta}}{\omega} + C_{L\theta R}B\phi + C_{L\theta I}\frac{B\dot{\phi}}{\omega}\right) \quad (1)$$

$$I(\ddot{\phi} + 2\xi_{\phi 0}\omega_{\phi 0}\dot{\phi} + \omega_{\phi 0}^2\phi) = M = \pi\rho B^3\omega^2\left(C_{M\eta R}\eta + C_{M\eta I}\frac{\dot{\eta}}{\omega} + C_{M\theta R}B\phi + C_{M\theta I}\frac{B\dot{\phi}}{\omega}\right) \quad (2)$$

L ：非定常揚力， M ：非定常空力モーメント
 η ：鉛直変位， ϕ ：ねじれ変位， ω ：円振動数

一般的に非定常空気力係数のうち、 $C_{M_{\eta I}}$ 、 $C_{L_{\theta R}}$ は値が小さければ小さいほど、また特に $C_{M_{\theta I}}$ は負で絶対値が大きいほどフラッターに安定的と言われている。さらに $C_{M_{\theta R}}$ は値が小さいほど、連成フラッターに対し安定性を向上させると言われている。

図-5 非定常空気力係数

図-5に非定常空気力係数のうち、上記に示した係数の結果を示す。各係数を比較すると無次元風速 $U/(fB)=15.0$ 以上でそれぞれの断面特性が異なっている。これは高風速時には高欄や検査車レールの付加物の設置位置により流れの状態が変化することを表している。

たわみ振動解析結果である $C_{M_{\eta I}}$ では、断面①、②において $U/(fB)=15.0$ を超える付近で正の勾配を示しており、断面③と特性が異なっている。ここから検

瞬間圧力分布図
瞬間流線図
図-6 強制加振時の流れ場(たわみ加振 $U/(fB)=15.0$)

査車レールを内側に付加することでたわみ振動に関して安定すると考えられる。次に、ねじれ振動解析結果である C_{LOR} , C_{MOR} , C_{MOI} では、各断面において理論値とほぼ同様の傾向を示している。その中で高欄の形状が異なる断面④では、他の断面に比べて C_{MOI} は負で絶対値が大きく、 C_{MOR} は値が小さい値を示している。ここから高欄の形状を変化させることでフラッターに対し影響がでると考えられる。

次に図-6 に流れ場の状態の状態として、非定常空気力係数に変化が表れ始める $U/(fB)=15.0$ 時の瞬間圧力分布と瞬間流線図を示す。まず、瞬間圧力分布図に着目すると、高欄の形状が異なる断面④、断面⑤では断面近傍の圧力が高くなっている。これは高欄 b では剥離した流れが断面に再付着していることから圧力が上がったと思われる。瞬間流線図に着目すると、センターバリアの存在により下流断面の再付着位置が断面側面となっており、その後検査車レール付近で再剥離している様子が確認できる。また、断面①と断面⑤では開口部に gap flow の存在が確認できる。一方、断面④では断面上面からの風と下面からの風が相殺し、開口部に入り込む風を抑制していると考えられ、それが非定常空気力の低減に作用したと思われる。

4.2 フラッター解析

前節で求めた非定常空気力係数を用いてたわみ・ねじれ 2 自由度フラッター解析を行う。その際の構造諸元を表-2 に示す。この条件は、東京湾横断道路を想定した支間 2,800m の吊橋における鉛直曲げ、ねじれの各 1 次モードの諸元⁹⁾を基にしたものである。

図-7、図-8 に風速 U と、算出されたたわみ・ねじれ両空気減衰率 δ の関係を示す。これによると図-7 のたわみ減衰率は全ての断面において常に正の値を示している。このことからギャロッピング現象のような鉛直曲げの発散振動は発生しないと考えられる。一方、図-8 のねじれ減衰率は正から負へと移行している。この時の風速でねじれフラッターの発現が危惧されるため、本解析断面ではねじれフラッターのみが問題となることが判る。

次に、表-3 に断面形状の違いによるフラッター発現風速を示す。各断面を比較すると、断面①を除く全ての断面が Theodorsen 理論よりも高い結果となり、開口部を有する橋梁断面の耐風性の高さがうかがえる。特に、断面②と断面③のフラッター発現風速は断面①と比較して約 1.5 倍程度大きく、検査車レールを内側に設置することで高い耐風安定性を有することが確認

できる。図-5に着目すると、最もねじれフラッターへ影響を及ぼすとされている $C_{M\theta I}$ はこの領域であまり差が出ていない。一方、連成項である $C_{M\eta I}$ と $C_{L\theta R}$ において $U/(fB)=15.0\sim 25.0$ 付近で各断面に顕著な差がみられる。このことから、 $C_{M\eta I}$ 、 $C_{L\theta R}$ 、 $C_{M\theta I}$ 、 $C_{M\theta I}$ が複合的に影響して耐フラッター性能を決定するのに対し、 $C_{M\eta I}$ と $C_{L\theta R}$ がフラッター性能には大きく影響していると推察できる。

以上、本報では、代表流速 U 一定として振動数 f を調整することで無次元風速を算出する手法を採用してきた。このため、高風速側になると加振振動数が小さくなることから、計算を開始してから流れ場が安定するまでの繰り返し計算数が増加する。そのため高風速側になるにつれて計算時間が増大することになる。また、同時に物体の動きがゆっくりとなることから静的な状態で求めた空気力の影響が解析上、顕著に現れると推測される。また、フラッターは静的な時間的な組み合わせであるため、静的空気力を正確に求めることが必要条件になる。

5. おわりに

本報では、橋梁構造物に作用する空気力評価と振動予測に関して、超長大橋を想定した二箱桁断面に高欄や検査車レールなどの付加物を付加し、その設置位置ならびに形状の違いによる耐風安定性の変化を LES による 3 次数値流体解析で検討することを説明してきた。ここでは、風洞実験という制御された流れを対象としてできる限り同一条件の基に解析を行ってきたが、実験結果と同一の結果を再現することはなかなか難しいものであった。これには、計算条件のわずかな差異、例えば軸方向の分割などや解析法の差異が如実に解析結果に反映してきて結果がばらつくなど、非線形解析を行う時の宿命とも言える。しかしながら、現状では風洞実験の再現性を考えた場合、LES による 3 次元解析手法が最も優れた手法の一つであると判断する。

一方、風洞実験においても実際の構造物に起こっている現象との対比而言えば、相似則の問題や風の乱れの問題など内在する中で、多年にわたる実績を持って信頼性を得てきた。数値流体解析においてもそのような意味で、設計実務に数値流体解析を試みて設計上の判断に有効な検知を積み重ね、実務に役立つという意味での予測可能な範囲を拡大することが望まれる。これが、数値流体解析の真の実用化のために大事である

表-2 構造諸元

桁幅 B	36 [m]
単位長さ重量 m	3000[kg f/s ² /m ²]
単位長さ極慣性 I	402100[kg f/s ² /m ²]
鉛直たわみ振動数 f_{η}	0.062[Hz]
ねじれ振動数 f_{θ}	0.126[Hz]
たわみ構造減衰率 $\delta_{\eta 0}$	0.02
ねじれ構造減衰率 $\delta_{\theta 0}$	0.02

表-3 フラッター発現風速

	フラッター発現風速 U_{cr}
断面①	40 m/s
断面②	61.1 m/s
断面③	62.4 m/s
断面④	51 m/s
断面⑤	45 m/s
Theodorsen	41.0 m/s

図-7 たわみ空気減衰率

図-8 ねじれ空気減衰率

と考えている。

ここで取り上げた断面や付加物が、円柱断面や隅角部に曲線を有する矩形断面など形状が単純なもの程、この難しさの傾向はさらに強くなる可能性が高い。例えば円柱断面での臨界レイノルズ数付近における流れの不安定さであるドラッグクライシス (Drag Crisis)

を捕らえる解析^{18),20)}が、研究段階の域を未だに出していないことなどである。特に、商用コード等を使う場合等、この問題は既に解決済みであると誤って解釈している研究者もいることを注意するべきである。

以上のように、数値流体解析で橋梁構造物に作用する空気力評価と振動予測を行う場合には、静的な状態での橋梁断面に作用する空気力を正確に求めることが必要条件である。さらに、これを満たすための格子生成やメッシュ分割等のモデル化、軸方向長さや分割、境界条件等の解析条件の設定等々、計算コストとの兼ね合いでの検討をしなくてはならないことが残されている。ただし、数値流体解析を行うハードウェアは、これから大幅な性能向上と低価格下が望める状況なので、ソフトウェア上の検討項目をハードウェアの進歩が網羅する可能性もある。このようになれば、数値流体解析 (CFD) による風工学への寄与はさらに大きくなると思われる。

最後に、ここで取り上げた二箱桁断面の空気力の解析は、川崎貴之 (東海旅客鉄道(株))、栗林伶二 (首都高速道路(株)) の中央大学大学院理工学研究科土木工学専攻での修士論文の研究の一環として行われたものであることを付記する。

参考文献

- 1) 耐風工学のための数値風洞実験に関する文献集, 土木学会耐風設計研究小委員会耐風工学数値実験分科会, 1989.3.
- 2) 風工学における数値計算の応用と評価研究小委員会報告書, 土木学会構造工学委員会, 1993.
- 3) 風工学における数値計算の応用と評価研究小委員会報告書成果報告会資料集, 土木学会構造工学委員会, 1999.
- 4) 風工学における数値解析と風洞実験の相互利用に関する研究小委員会報告書, 土木学会構造工学委員会, 2004.
- 5) Open FOAM:<https://openfoam.org/maintenance/>
- 6) 日本建築学会(編): 建築物荷重指針・同解説〈2015〉, 日本建築学会, 2015.
- 7) 岸田岳士, 田村哲郎, 野津剛, 勝村章, 奥田泰雄, 溜正俊: LESによる建築物の風荷重評価の実用化検討, 風工学シンポジウム論文集, Vol.22, pp.293-298, 2012.
- 8) 出野真由子, 吉住文太, 曾我明, 井上浩男: 付加物を有する二箱桁断面における耐風安定性の検討, 構造工学論文集, Vol. 53A, pp. 634-641. 2007.
- 9) 平野廣和, 渡邊茂, 丸岡晃, 佐野健一: 3次元数値流体解析における軸方向長さの検討—断面辺長比4の矩形断面の場合—, 土木学会論文集 No.647/I-51, pp.447-452, 2000.
- 10) 川崎貴之, 樽川智一, 佐藤亮, 平野廣和, 佐藤尚次: 数値流体解析による二箱桁断面橋梁の耐風安定性の検討, 土木学会応用力学論文集 Vol.11, pp.761-768, 2008.
- 11) 黒田眞一: 2方程式乱流モデルを用いた長大橋非定常空気力の数値計算, 土木学会論文集 No.654/I-52, pp.377-387, 2000.
- 12) 嶋田健司, 石原孟: $K-\epsilon$ モデルによる扁平断面の非定常空気力予測, 計算工学論文集, Vol.6, No.1, pp.285-288, 2001.
- 13) 嶋田健司, 石原孟, 若原敏裕: $K-\epsilon$ モデルによる矩形断面柱のフラッター解析, 第17回風工学シンポジウム, pp.291-296, 2002.
- 14) 丸岡晃, 平野廣和: 数値流体解析による非定常空気力の算出について, 応用力学論文集, Vol.3, pp.707-712, 2000.
- 15) Theodorsen, T.: General Theory of Aerodynamic Instability and the Mechanism of Flutter, Technical report, US National Advisory Committee for Aeronautics, 1935.
- 16) 石原孟, 嶋田健司, 山崎康嗣, 池田虎彦: 3次元数値流体解析による斜張橋主桁断面の空力性能の予測, 構造工学論文集, Vol.52A, pp.611-620, 2006.
- 17) 伊藤靖晃, J. Michael R. Graham: LESによる箱桁橋梁断面の空気力評価とスパン方向解析領域の影響の検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.73, No.1, pp.218-231, 2017.
- 18) 糟谷直樹, 平野廣和, 丸岡晃, 佐藤尚次: 数値流体解析を用いた臨界領域における円柱まわりの流れの特徴の把握, 土木学会構造工学論文集, Vol.60A, pp.410-417, 2014.3.
- 19) 渡邊茂, 丸岡晃, 井上浩男: フェアリングを有する箱桁断面に作用する静的空気力の数値流体解析による検討, 第17回風工学シンポジウム論文集, pp.219-224, 2002.12.
- 20) 小野佳之, 田村哲郎: 臨界レイノルズ数域における円柱まわりの非対称流れに関する LES, 第23回風工学シンポジウム論文集, pp.199-204, 2014.12.