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

Computational Fluid Dynamics Analysis for Wind stability of 2-box girder bridge

川崎 貴之*・樽川 智一**・佐藤 亮*・平野 廣和***・佐藤 尚次****

Takayuki KAWASAKI, Tomokazu TARUKAWA, Akira SATO, Hirokazu HIRANO and Naotsugu SATO

* 中央大学大学院理工学研究科土木工学専攻(〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)
 **修士(工学)神奈川県庁(〒231-8588 神奈川県横浜市中区日本大通1)
 (研究当時:中央大学大学院理工学研究科土木工学専攻)
 ****工博 中央大学総合政策学部 教授(〒192-0393 東京都八王子市東中野 742-1)
 ****工博 中央大学理工学部 教授(〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

In general, it is said that the bridge in 2-box girders is excellent in the wind-resistant stability. However, the wind-resistant performance is changed by the difference between the additional materials. In this paper, the difference of the aerodynamics forces and the flow field by the presence of the wind-resistant stabilization material is calculated quantitatively and qualitatively by using computational fluid dynamics (CFD). Furthermore, the vibration-generating mechanism and the wind-resistant performance improvement factor is examined, and the effectiveness of the wind stabilization material added to 2-box girder bridge is suggested.

Key Words: CFD, aerodynamics forces, 2-Box Girder, wind-resistant stability

1. はじめに

20世紀に本州四国連絡橋建設で培われて来た長 大橋技術が、21世紀の今日に十分に伝承されていな いとの指摘がなされている.一つの解決策として、 次世代海峡横断道路プロジェクトなどの実現を検討 することも考えられる.ところで、橋梁に用いる材 料強度の向上、新たな制振機構の開発などに代表さ れる新技術の蓄積によって、長大橋さらには超長大 橋の架設が可能となってきている.この実現のため にも、従来よりも高い耐風安定性と経済性を両立し た長大・超長大橋梁の断面形状が求められることに なる.

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 ラッター性能の向上に関しては、従来から断面形状 やガイドベーン、センターバリア等の付加物の種類 をパラメータとした風洞実験による検討が行われて きた¹⁾⁻⁵⁾.これらの検討から、二箱桁断面は耐風安 定性に優れた断面ではあるが、付加物の微妙な違い で耐風性が敏感に変化することが指摘されている. さらに空力特性に与える影響については、不明確な 点が多く、十分な解明がなされていない.この背景 には、長大・超長大橋に用いられる箱桁断面が比較 的偏平であることから、付加物の影響も含め平板翼 理論のような理論解析の適用は難しいことにある. このため、各種付加物の付加による耐風性の検討は、 風洞試験により試行錯誤的に決定されているのが現 状であり、断面改良の余地が残されている.

一方,計算機性能の向上に伴って,数値流体解析 (CFD: Computational Fluid Dynamics)が大きな進歩を 遂げ,今後も更なる解析技術の発展が見込まれてい る.従来の研究では,橋梁断面の流れ解析において も3次元解析が必要であることが論じられている. これは,2次元解析ではスパン方向の変動に起因す るエネルギー散逸を考慮できないことから,剥離渦 を強めに評価してしまうことによる^{6,7)}.今後は, 詳細な検討を行う場合には,3次元解析を用いた研 究が主流になることは間違いない.しかし,橋梁設 計実務の観点から CFD の利用を検討すると,3次元 解析は計算機能力,コストパフォーマンスを加味す ると未だ設計者が自由に行えないのが現状である.

このような背景から,本研究では CFD を用いるこ とで, CFD と風洞実験の相互利用により断面開発の コストダウンを計るための一つの方法を提案する. さらに,物理量の可視化等により,ここで生じてい る現象の把握を行い,二箱桁断面橋梁での耐風安定 化部材の有無による静的空気力や流れ場の相違等を 定量的・可視的に評価する.そして,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耐風安定化部材の有効性 を示唆することを目的とする.なお,本研究では特 に風洞実験を行う前の検討段階での CFD の利用を 前提とし,かつ定量的な把握を目的とするので,前 述の通り3次元解析を行う必要があることを認識し つつ,精度上問題があることを十分に承知した上で, 短時間でかつ簡単に解析を行うことができる2次元 解析をあえて選択する.さらに,2次元解析で何処 まで現象を再現できるか,その適用性に関しても検 討を行うものである.

2. 解析概要

2.1 基礎方程式

流れ場の支配方程式は、非圧縮 Navier-Stokes 方程 式を用いる.

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u\right) - \nabla \cdot \sigma(p, u) = 0 \quad on \ \Omega \tag{1}$$

$$\nabla \cdot u = 0 \qquad on \ \Omega \tag{2}$$

ここで、uは流速、pは圧力、 ρ は密度、 Ω は 境界である.また、 σ は応力テンソルであり、 次のように定義される.

$$\sigma(p,u) = -pI + 2\mu\varepsilon(u), \ \varepsilon(u) = \frac{1}{2} \left(\nabla u + (\nabla u)^T \right)$$
(3)

ここで, μは粘性係数, Ιは単位テンソルである.

2.2 乱流モデル

乱流モデルを適用するとことにより非圧縮 Navier-stokes 方程式はレイノルズ平均され, 非定常の流れ場に対して,アンサンブル平均を 施して物理量を時間平均的に求められる.また, 応力テンソル $\sigma(p,u)$ は式(4)で表わされる.

$$\sigma(p,u) = -p'I + 2(\mu + \rho v_i)\varepsilon(u), \ p' = p + \frac{2}{3}\rho k_i \qquad (4)$$

ここで v_i は渦動粘性係数であり、乱流モデルに より求まる.本研究では、RANSのSAモデル を採用し v_i を求める.また、 k_i は乱流エネルギ ーであり圧力項に換算圧力p'として k_i を含め て扱うことができるため陽には表れない. 本研究で用いる SA モデル^{8),9)}は, 乱流粘性係数に 関する方程式を解いて乱流係数を求めるモデルであ る. 航空関係の CFD で解析精度の点で評価の高いモ デルであり,本研究の様に比較的偏平な断面を扱う には適していると考えられる.しかし,断面辺長比 の小さい断面などの解析では,計算の安定性の点で 他の乱流モデルよりも劣る場合があり,解析にはあ る程度の経験を有することが指摘されている⁸⁾.

これに対して, SA モデルを偏平な橋梁断面回り の流れに適用した研究としては,川本ら⁹の研究が ある.1箱桁断面では有効性が示されてはいるが,2 箱桁断面では開口部の格子解像度の問題があり,実 験値との対応すべき結果が得られていない.本研究 では,この点を十分考慮した要素分割解像度を行う こととし,渡邊ら⁷⁾の3次元解析の研究で行われた 2箱桁断面の分割を参考にする.

2.3 解析手法

数値流体解析には、丸岡ら¹⁰⁾が提案している IBTD/FS 有限要素法を適用する.これにより、運動 方程式(1)は IBTD 法,連続式(2)は FS 法により離散 化される.本手法では,流速と圧力は分離して求ま り,それぞれ陰的に解くことになるが,代数方程式 の行列が対称となる特徴を有するため,対称行列用 の代数方程式の解法のみで解析することができる.

2.4 解析条件

本研究で用いた3種類の断面形状を図-1に示す. ここで断面①は、断面辺長比 B/D=4(B:桁幅,D: 桁高)と開口部幅 4D を組合せた二箱桁であり、本 研究ではこの断面を基本とする. 断面②は、断面① にフェアリングを付加(基本断面+フェアリング) したものであり、断面③は、断面②にセンターバリ アを付加(基本断面+フェアリング+センターバリ ア)したものである. ここでの断面②, ③は、出野 らの研究グループ⁵⁾が明石海峡大橋を超える長大橋 を想定して行った風洞実験断面である. 本研究では この断面での風洞実験結果と比較することを目的と し、風洞実験モデルと同一の寸法を用いてモデル化 を行っている.

表-1 に解析条件を,図-2 に解析領域を示す.解析 領域は風上側断面から前方は 11.5D,風下側断面か ら後方は 23.5D,側方は 11.0D である.境界条件は, 流入境界で無次元流速である一様流速 1.0,流出境 界は移流境界条件とする.また,側方で slip,物体 周りで no-slip である.

解析する迎角は, 迎角 α=0°を中心に-10° ~10° の間を迎角1°ピッチで行う.

3. 解析結果

3.1 静的空気力係数

各断面における静的空気力の特性を検討する. 図 -3 に静的空気力係数の実験値⁵⁾との比較を示す. な お,断面③の実験値は,検査車レールが付加された 形状であるが,本研究では,これを考慮していない.

図-3(a)に示す平均抗力係数に着目すると、断面 ②、断面③は断面①に比べ、迎角を増加させても抗 力が低く抑えられていることから、抗力低減効果の ある断面であることがわかる.

図-3(b)に示す平均揚力係数では,迎角 α=5°~6° において,断面①は負勾配になっているため,振動 現象発生の可能性が推測される.一方,断面②およ び断面③は,同迎角付近において勾配は緩やかにな るが,負勾配になっていない.これにより,断面②, 断面③が振動現象発生の起振力抑制に効果がある と予想される.

図-3(c)に示す平均空力モーメント係数に着目す ると、断面②の空力モーメント係数は、迎角 α=4° を越えると断面①のそれよりも大きな値を示して いる.これに対して、断面③では空力モーメント係 数の勾配は、迎角を大きくしても断面②より小さく 抑えられているのがわかる.これらは、図-3(b)の 揚力係数にも同様な傾向を見ることができる.揚力 係数及び空力モーメント係数が緩やかな正勾配を 有する断面は、耐風性に優れた断面の特徴であるこ とから、これを考慮すると断面②に比べ断面③のほ うが耐風安定性に優れた断面形状であることが考 えられる.これより、フェアリングとセンターバリ アを同時に付加することで、振動現象を発生させる 空気力の低減効果を期待できる可能性が高い.

また,断面②の静的空気力係数の値と風洞実 験結果⁵⁾との比較に関しては,迎角α=4°を超え ると徐々に乖離が見られる.しかし,基本設計 での検討段階で扱われることの多い迎角範囲 内(±3°)においては,ほぼ遜色ない精度が得ら れている.このことから,開口部の要素分割数 を十分にとることで,基本設計での検討段階に おける二箱桁断面の2次元解析が,適用できる ことが考えられる.一方,断面③では小迎角領 域においても実験値との乖離がみられる.これ はセンターバリア付近での大規模な剥離を伴 う現象には,RANSのSAモデルは適さないこ とが考えられ,乱流モデルの変更や3次元解析 への移行が必要である.



図-1 断面形状

表-1 解析条件

| 断面形状 | 断面① | 断面② | 断面③ |
|-----------|--------------------------|------------------------|--------------------------|
| Reynolds数 | Re=3.0 × 10 ⁴ | $Re=3.0 \times 10^{4}$ | Re=3.0 × 10 ⁴ |
| 時間増分 | ⊿t=0.01D/U | ⊿t=0.01D/U | ⊿t=0.005D/U |
| 最小要素幅 | 0.00035D | 0.00035D | 0.00035D |
| 総節点数 | 58801 | 43119 | 46878 |
| 総要素数 | 58264 | 42724 | 46460 |



図-2 解析領域





瞬間圧力コンター図



時間平均流線図 断面①



瞬間圧力コンター図



時間平均流線図 断面②





<u>断面③</u>







3/4 周期





4/4 周期



1/4 周期



2/4 周期



3/4 周期



4/4 周期



1/4 周期



3/4 周期



2/4 周期



4/4 周期



断面②



3.2 流れ場の状態

(1) 瞬間圧力と時間平均流線の比較

図-4 に,三つの断面における迎角 α=0°での 最大揚力時の瞬間圧力分布図および揚力変動 1 周期分における時間平均流線図を示す.

瞬間圧力分布図から断面①では風上・風下断 面前縁で負圧となる剥離バブルが大きく,風下 断面前縁での圧力変動が激しい.また,開口 部・風下断面後流にて渦の発生が見られる.平 均流線図からは剥離後の流線は大きく断面か ら剥がれているのがわかる.

断面②に関しては圧力分布図より,風上・風 下断面前縁での剥離バブルが断面①に比べて 小さく、かつ風下断面前縁での圧力変動も小さ く抑えられている.これは時間平均流線図から わかるように、断面①では風上断面前縁部で剥 離した流線は大きく断面から離れた後、再付着 するが、断面②ではフェアリングを風上断面前 縁部と,風下断面後縁部に付加することで,流 線が断面に沿うような流れとなり、剥離後すぐ に再付着したためだと考えられる. それに伴い 再付着位置が断面①と比較して前方へと移動 し、風下断面後流での渦発生は見られなくなり、 開口部での負圧となる渦の規模も小さく抑え られている.これより、フェアリングを付加す ることによって、剥離バブルからの渦を軽減で き、断面前後での圧力差が小さくなり、抗力を 低減させていると考えられる.

断面③に関しては圧力分布図より,断面①・ 断面②でみられた風下断面前縁での圧力変動 が抑制できている.これは時間平均流線図より, センターバリアを付加することで,風下断面の 上下側面に流れが再付着するためである.風下 断面での圧力変動を低減できたため,圧力分布 がセンターバリア周りにのみ集中する結果と なり,空力モーメント低減に寄与していると考 えられる.このことが図-3における断面③の揚 力,空力モーメントの勾配を低減させた要因だ と考えられる.

(2) 圧力分布の変化

図-5 に迎角 α=0°時の各断面の揚力係数 1 周 期分の 1/4 周期毎の各断面の圧力分布図を示す.

断面①では開口部および風下断面後流にて 渦の発生が見られる.また、1/4 周期時に風下 断面前縁部で見られる剥離バブルが、2/4 周期 時には剥離渦となり断面後方へと流れている のが見てとれる.そして 3/4 周期時にはさらに 後方へと流れ、4/4 周期時には断面後流の渦と 結合している.1/4-4/4 周期の風上断面周りと 風下断面周りの圧力変動を比較してみると、風 下断面のほうが大きい.これより、空気力の発 生に風下断面が大きく寄与していると思われ る.

断面②では 1/4 周期時の風下断面前縁での剥 離バブルは断面①と比較して小さいのがわか る.2/4 周期時・3/4 周期時に剥離バブルは断面 ①と同様に後方へと流れていくが,4/4 周期時 には剥離渦が消えているのがわかる.これはフ ェアリングを付加することで,流れがスムーズ になったことで,初期の剥離バブルを小さく抑 えられたことが原因だと考えられる.また,1/4 〜4/4 周期の風上断面周りと風下断面周りの圧 力変動を比較してみると,断面①同様に風下断 面の変動が大きい.このことから,断面②も空 気力の発生には風下断面の影響が寄与してい ると考えられる.

断面③では、1/4 周期時にはセンターバリア 直後に大きな負圧が見られ、2/4 周期時には後 方へと流れている.3/4周期時・4/4周期時には 風下断面側面上を渦が後方へと流れている.こ のことから、センターバリアの形状によっては 風の受動面積が増え,センターバリア後流の負 圧が大きくなることが考えられる. また, 1/4 〜4/4 周期の風上断面周りと風下断面周りの圧 力変動を比較すると断面①・断面②と異なり, 風下断面より風上断面の圧力変動が大きいこ とが定性的にわかる.この原因は前述したよう にセンターバリアの付加により,風下断面の再 付着点が前縁から側面に変化したことに起因 すると思われる. つまり, センターバリアを付 加することで、断面③の空気力発生は風上断面 が寄与するように変化したと思われる.





3.3 Strouhal 数 St の変化点

図-6 に Strouhal 数 S_t と迎角の関係を示す. ここで S_tは, 揚力係数の変動成分より卓越周波数を算出し て求めたものである. 各断面で S_tの状態は異なり, 断面①では迎角 α =6°を境に急激に変化している. 迎 角 α =6°で断面①は, S_t=0.122, 0.049 の 2 つの卓越す る S_tが見られ, 風上断面では前者が, 風下断面では 後者が卓越しており, 迎角 α =6°が流れのパターンの 変化する境界だと考えられる. また, 断面②では **α=2°-6**°にかけて徐々に変化し、断面③では **α=3**°**-**5°にかけて変化している.

各断面の S_t の変化前後の時間平均流線図を図-7 に示す. S_t の変化は図-7 より再付着点の変化に起因 しており、断面①に関しては、 $\alpha=6^\circ$ 時を境に、再付 着位置が断面上面から断面後面へと変化している. また、断面②に関しては、迎角 $\alpha=2^\circ-6^\circ$ にかけて再 付着点が断面後方へと移行し、風上断面後面、風下 断面フェアリング部に変化している.断面③ではセ ンターバリア上端で剥離した流れの再付着位置が風 下断面側面からフェアリング部へと移行し、センタ ーバリア下部で剥離した流れの再付着位置が風下断 面側面から前面へと変化している.

しかし,図-7の断面①(α=7°)の時間平均流線 図をみると,再付着位置が時間平均的にではあ るが,断面の後面に再付着しており,平野ら⁶⁾ の1:4角柱の3次元の解析結果とは異なること から,実現象の再現には至っていないと判断す る.この原因として考えられることは,本研究 手法の乱流モデルに RANS の SA モデルを採用 したためだと思われる.流れの状態が変化する 領域において,RANS の SA モデルを用いた 2 次元解析の実験値との乖離は田高ら⁸⁾によって も報告されており,本研究手法では,迎角が大 きくなり剥離の影響が強くなる領域での流れ 場の再現精度が低いと思われる.

4. おわりに

本研究では、海峡横断道路プロジェクトに代表される長大・超長大橋を想定し、検討段階での CFD の利用を検討してきた.これにより、 試行錯誤的に行われてきた風洞実験の実験回数を減らすことができるとともに、付加物の形状変化にも柔軟に対応できることから、経済的な断面開発とコストダウンを計ることが可能となる.事例として耐風安定性に優れた断面ではあるが、付加物の微妙な違いで耐風性が敏感に変化することが指摘されている二箱桁断面を取り上げ、付加物の組み合わせによる静的空気力係数の変化と流れ場の状態変化を定量的に検証した.本研究のまとめを以下に記す.

(1)空気力係数の解析値と風洞実験値との比較 より、断面③では若干の乖離がみられるが 迎角±3°の範囲内においては、定性的に現 象を把握できた.これより、開口部の要素 分割数を十分とることで、二箱桁断面の2 次元解析が,基本設計の検討段階において 適用できると考えられる.

- (2) フェアリング付加により、剥離後の流れが 断面に沿うようスムーズに流れ、このこと が剥離渦の発生抑制につながると考えられ る.その結果、抗力低減効果がみられる.
- (3)フェアリング・センターバリア同時付加に より、風下断面の側面に流れの再付着点が 変化するため、風下断面での圧力変動が緩 和される.これにより揚力・空力モーメン トが低減し、フェアリングのみ付加の場合 に比べて耐風安定性を増している.
- (4) 断面①, 断面②では圧力変動の大きい風下 断面が空気力発生に寄与し, 断面③ではセ ンターバリアを付加することで, 風下断面 周りの圧力変動を小さく抑えられ, 風上断 面が空気力発生に寄与している傾向がみら れる.
- (5) 流れの再付着点変化に伴う流れのパターン 変化の検討より,剥離の影響が大きくなる 高迎角領域では,2次元解析での流れの場の 再現精度は低い.

ところで本研究は、空気力の定量的な検討に は小迎角の範囲では有効であるが、振動の発生 原因や耐風性能向上の要因の明確な特定とい った定性的な検討においては課題がみられる. 第一の検討課題として、付加物の形状による空 気力・流れ場の変化にも着目し、小迎角範囲で 動的解析により振動状態にある断面への耐風 安定化部材の有効性、空気力低減のメカニズム の検証をおこなっていくことである.第二には、 計算時間、コスト等々多々の問題はあるものの LES に基づく3次元解析を検討し、より実現象 に近い流れ場の再現を目指していくことであ る.

謝 辞

本研究を行うに際し、八戸工業高等専門学校 丸 岡晃准教授の協力と貴重な助言を得た.ここに記し て感謝の意を表す.最後に、本研究の一部は(独)日 本学術振興会科学研究費・基盤研究(C)及び中央大学 理工学研究所共同研究助成の給付を受けたことを付 記する.

参考文献

- 佐藤弘史,萩原勝也,松藤様照,鳥海隆一, 日下部毅明,嶋本英治,星加益朗:開口部 付箱桁を有する超長大橋の耐風性に関する 検討,第14回風工学シンポジウム論文集, pp.407-412, 1996.12.
- 佐藤弘史,萩原勝也,横山功一,松藤様照, 嶋本英治,星加益朗: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.44A,pp.937-942,1998.3.
- 佐藤弘史,楠原栄樹,大儀健一,北川信, 伊藤進一郎:超長大橋の一様流中における 耐風性,第16回風工学シンポジウム論文集, pp.351-356,2000.11.
- 4) 松本勝,白土博通他:鉛直板付き分離箱桁の フラッター特性,第18回風工学シンポジウム, pp.311-316, 2004.12.
- 5) 出野麻由子,吉住文太,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.643-641, 2007.3.
- 6) 平野廣和,渡邊茂,丸岡晃,佐野健一:断 面辺長比4の矩形断面の空力特性に関する 2次元・3次元数値流体解析,土木学会論文 集 Vol.598/I-44, pp401-411, 1998.7.
- 7) 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.
- 8)田高真人,天間祐輔,丸岡晃:数値流体解 析による断面辺長比4の矩形断面の空力応 答特性に関する検討,応用力学論文集 Vol.8, pp.783-792,2005.8.
- 9) 川本英樹,吉田秀則,尾立圭巳:橋梁断面の静的空気力の2次元非定常乱流解析,第
 16 回風工学シンポジウム論文集, pp.191-196,2000.12.
- 丸岡晃,太田真二,平野廣和,川原陸人: 同次補間を用いた陰的有限要素法による非 圧縮性粘性流れの解析,構造工学論文集, Vol.43A, pp.383-394, 1997.3.

(2008年4月14日受付)