

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

三井造船(株) 正 員 渡邊 茂 三井造船(株) 正 員 井上 浩男
三井造船(株) 正 員 林 健一

1. はじめに

橋梁を代表する土木構造物において、その耐風性の検討には従来より風洞試験が用いられ、多くの研究成果が報告されている。その一方で、近年の数値計算機ならびに数値解析手法の発達により、土木工学の分野においても構造物に及ぼす風の作用を数値流体力学(CFD)を用いて評価しようとする試みが行われている。CFDによる耐風性の評価手法が確立し、風洞試験の予備検討などに適用できれば、コストの削減のほか、得られた物理量の可視化等による一層の現象理解が可能となる。その数値解析結果の妥当性の検討に際して、主に矩形断面等の基本断面において数値解析結果と風洞試験結果との比較が行われ、作用空気力や表面圧力分布等が定性的に一致している結果も報告されている。

本論では、解析対象として矩形断面にフェアリングを付加させた1箱桁断面および中抜き部を有する2箱桁断面を選択し、静的な3次元流体解析を試みた。具体的には、有限要素法を用いたLESによる解析¹⁾を行い、1および2箱桁断面で得られた静的空気力、揚力の無次元周波数および表面圧力を評価した。さらに、非定常な3次元の流れ場を可視化することにより、それぞれの断面での静的空気力の発生機構を考察するものである。

2. 解析方法

基礎方程式には、Smagorinsky型LES乱流モデルによる空間的なフィルタリング操作を施した非圧縮性Navier-Stokes方程式を用いた。時間方向の離散化にCrank-Nicolson法を適用した。空間方向の離散化には有限要素法の解析手法であるIBTD法²⁾を適用した。表-1に解析条件、図-1に1および2箱桁の断面諸元を示す。ここで、 D 、 B はそれぞれ見附幅および弦長、 U は主流方向の流入流速である。境界条件に関しては、平面解析領域の流入端、上下端で U を与え、流出端では移流型境界条件を与えた。また、軸方向(3次元方向)の端部境界には周期境界条件を適用した。

表-1 解析条件

Reynolds数	$Re = 1.0 \times 10^4$
時間増分	$\Delta t = 0.05 D/U$
モデル定数	$C_s = 0.13$
解析領域	$\pm 67.5D \times \pm 60.0D \times 6.4D$
軸方向分割幅	$\Delta z = 0.2D$
軸方向分割数	32層
平面要素分割数	1箱桁: 30,976, 2箱桁: 32,336
最小要素幅	$5.78 \times 10^{-3} D$

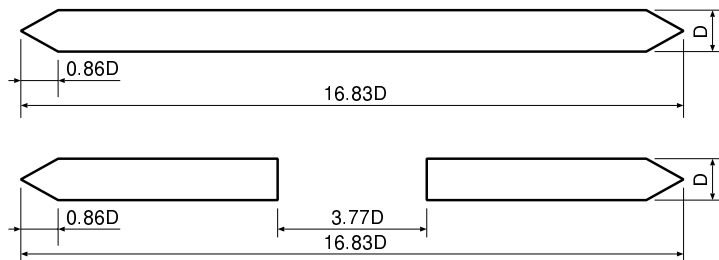


図-1 断面諸元(上: 1箱桁断面, 下: 2箱桁断面)

3. 結果と考察

本論では、物体前縁および後縁フェアリング部(以下、「前縁部」、「後縁部」)、さらに2箱桁に関しては風上および風下物体中抜きコーナー部(以下、「中部風上」、「中部風下」)で発生する剥離渦に着目し、それぞれの物体で発生する静的空気力、物体表面圧力および流れ場を考察した。さらに、類似した形状の断面で行われた既存の風洞試験³⁾との比較から、本論の1および2箱桁断面の静的空気力の周波数特性に関する考察も加えた。

図-2(左: 1箱桁, 右: 2箱桁)に、抗力係数(C_d)、揚力係数(C_l)およびモーメント係数(C_m : ピッチング)の時刻歴を示す。なお、 C_l 、 C_m の縦軸は、上向きおよび時計回りをそれぞれ正とした。図-2より、1および2箱桁の各時刻歴を比較すると、 C_d の平均値は2倍弱、 C_l 、 C_m の変動振幅は3~5倍程度2箱桁の方が大きくなり、作用する空気力の違いが分かる。しかし、 C_l と C_m の位相関係に関しては、どちらの断面もほぼ逆相となる。

また、揚力の無次元周波数は、1および2箱桁でそれぞれ0.249、0.176と、1.4倍程度1箱桁の方が大きい。矩形断面および前・後縁の片・両側にフェアリングをそれぞれ付加した既存の風洞試験結果³⁾で得られたストローハル(St)を用いて、本解析結果を分類すると、本1箱桁の周波数は前後縁にフェアリングを付加した試験結果($St = 0.260$)、2箱桁は前縁にフェアリングを付加しない単体物体の試験結果(矩形断面: $St = 0.142$, 後縁のみ: $St = 0.135$)に近い。

Key Words: 数値流体解析, LES, 箱桁断面

〒196-0012 昭島市つつじが丘 1-1-50, TEL:042-545-3114, FAX:042-546-3570

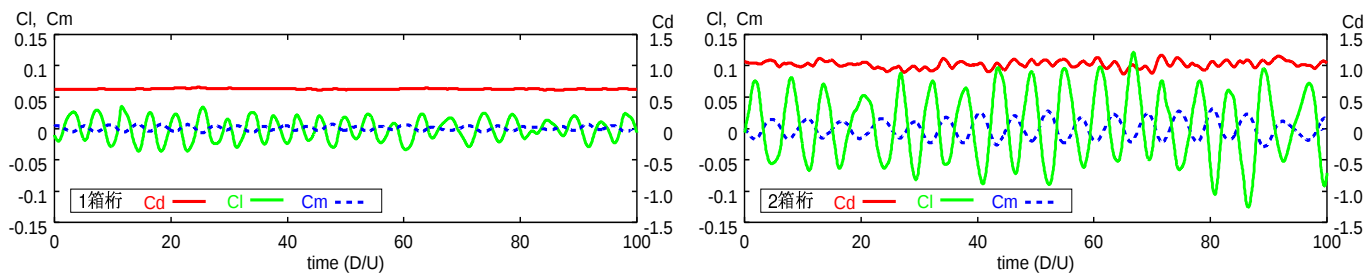


図-2 空気力係数の時刻歴（左：1箱桁断面，右：2箱桁断面）

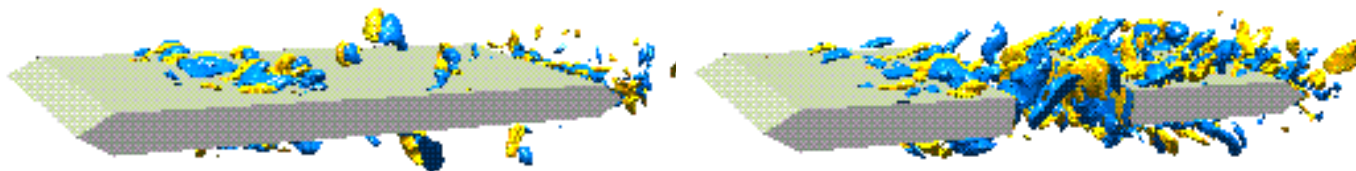


図-3 渦度の等値面鳥瞰図（左：1箱桁断面，右：2箱桁断面）

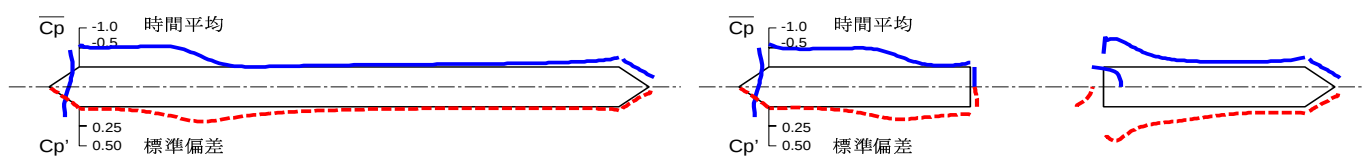


図-4 表面圧力分布（左：1箱桁断面，右：2箱桁断面）

図-3（左：1箱桁，右：2箱桁）に，瞬間値における渦度の等値面鳥瞰図（渦度： $\omega_z = \pm 1.0$ ）を示す．図-3より，1および2箱桁ともに，前縁部の角度に沿った流れがフェアリングの付け根から3D程度後方に再付着し，渦が発生している様子が分かる．その後，1箱桁では後縁部のみで比較的小規模な剥離（カルマン渦）が生じる一方，2箱桁では中部風上で剥離した流れが中部風下で大規模な剥離・再付着を生じ，3次元性が強い複雑な流れ場を形成している．

図-4（左：1箱桁，右：2箱桁）に，時間平均（上半分： $\overline{C_p}$ ）および標準偏差（ C_p' ：下半分）での物体表面圧力分布を示す．鳥瞰図と同様，前縁部からの剥離・再付着点付近までは，1および2箱桁ともに類似した圧力分布傾向を示す． C_l と C_m の位相関係は1および2箱桁ともに逆相なので（図-2参照），1および2箱桁ともに物体中心に対し風下側の位置関係にある物体表面部での変動圧力が， C_l および C_m の変動に寄与していることになる．

変動圧力分布より，1箱桁では明かに前縁部からの再付着点近傍で変動が大きい，物体上下面で生じる剥離・再付着現象同士の周期的な相関が小さいため，後縁部で生じるカルマン渦による変動圧力で周期的な変動空気力が発生していると考えられる．このことは，（紙面の都合で省略するが）前縁部の形状が同様な2箱桁断面の風上側物体（単体）に作用する空気力の時刻歴（変動）が周期性を明確に持たないことから確認できる．

一方，2箱桁では明かに中部風下での変動が大きく，風下側の物体の形状が発生空気力を支配していることが分かる．

4. おわりに

以上の検討より，本論で採用した1および2箱桁断面では，それぞれ後縁フェアリング部および風下側中抜きコーナー部で生じる剥離現象ならびに変動表面圧力が変動空気力を支配することが分かった．さらに，風洞試験結果との比較より，2箱桁断面の変動空気力の特性は風下側中抜きコーナー部の形状が影響している結果が得られた．よって，本論で採用したような前・後縁にフェアリングが付加された2箱桁断面では，風下側の前縁コーナー部にフェアリング等を付加することで，断面に作用する空気力の変動を抑えられる一方，渦励振開始風速を引き下げてしまう結果となり得る可能性を示した．今後はより詳細な検討を行うとともに，強制加振時の非定常空気力に対する検討を行う予定である．

なお，本研究結果は国土交通省土木研究所，本州四国連絡橋公団，土木研究センターおよび民間企業8社で行っている「経済性を考慮した超長大橋の耐風設計に関する共同研究」の成果の一部である．

参考文献

- 1) 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.3A，pp.707-712，2000．
- 2) 丸岡晃，太田真二，平野廣和，川原睦人：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，Vol.43A，pp.383-394，1997．
- 3) 松本勝，島原明，藤井大三，大東義志：充腹構造断面の渦励振に及ぼす乱流効果に関する実験的研究，風工学シンポジウム論文集，Vol.14，pp.497-502，1996．