

I-B9 剥離・再付着型矩形断面の流れ特性に関する数値解析

中央大学 学員 渡邊 茂
中央大学 正員 平野 廣和中央大学 学員 丸岡 晃
中央大学 正員 川原 陸人

1 はじめに

流れ場に置かれた物体の表面圧力分布と流線の関係は密接である。偏平箱桁橋の基本断面である矩形断面では、流れの剥離点が風上側の断面縁端に存在し、剥離流が断面に再付着しない完全剥離型と、付着する再付着型に大きく分けられる。風上側の断面縁端から剥れた流れにより渦流が形成され、縁端後流側物体上面に負圧が生じることが知られている。さらに、再付着型の場合、剥離流の再付着点付近の表面圧力が高くなる傾向がある。また、 $B/D \approx 2.8$ (B は桁幅、 D は桁高) のところで、 B/D に対するストローハル数 (St 数) の急変が風洞実験^[1]の結果により明らかにされている。その St 数の急変は流れの再付着が原因であると言われている。風洞実験^[1]により、完全剥離型と再付着型の境は St 数の急変点同様、水平風のもとで $B/D \approx 2.8$ とされている。偏平箱桁橋におけるフラッターや連成フラッターなどの構造と流れの連成問題を取り扱う場合には、その剥離流の再付着現象を再現することは非常に重要である。

一方、急速な計算機性能の向上に伴い数値流体力 CFD が大きな進歩をとげ、風工学の分野でも着実に成果を挙げている。近い将来、 CFD が風洞試験に置き換わることはないまでも、風洞試験のある部分を代替えしたり、風洞試験と相補う使用形態になることが予想される。しかし、2次元数値解析では縁端から剥離した流れがすぐに巻き込みをおこすなどの問題が生じる。この現象は、 B/D が比較的大きな断面に対しては特に影響があると考えられる。

このような背景から、本論文では、数値流体解析による偏平箱桁橋断面補剛桁橋梁の耐風設計技術の確立を目指すために、長方形断面である辺長比1:4の矩形断面周りの2次元及び3次元での有限要素法による数値流体解析を行った。具体的には、比較的低レイノルズ数 (Re 数=3000)での解析を行い、断面周りの圧力係数 (C_p) を算出する。また、剥離流の再付着点及び背圧係数 (C_{pb})、上下面の静圧を検討するものである。これにより、2次元解析と3次元解析との違いを指摘する。併せて煙風洞で行った実験結果との比較も行う。

2 基礎方程式と離散化

風の流れ場の基礎方程式は非圧縮性の Navier-Stokes 方程式である。時間方向の離散化は、運動方程式には Crank-Nicolson 法を適用し、非圧縮性の連続式に完全陰的に取り扱う。空間方向の離散化は、改良型 BTD 法と FS 法を組み合わせた有限要素法^[2]を適用する。この手法の場合、対称行列の陰解法であることから、計算効率と安定性に関して優れている。よって、耐風工学における数値解析のような大規模3次元解析に適している。

3 解析条件

矩形断面では、低い Re 数であっても流れの剥離点が風上側縁端に固定されているので円柱などの他の断面に比べ、設計実用風速域での Re 数の依存性が少ない。そこで、本解析では、辺長比が1:4の矩形断面周りの数値流体解析を比較的低 Re 数 (Re 数=3000) で行った。

3次元解析における解析領域と境界条件を Fig.1 に示す。断面高の D を代表長として、鉛直方向に $20D$ (閉塞率5.0%)、水平方向に $40D$ とし、この領域内に、左端から $10D$ の位置に断面中心が来るように配置した。境界条件は物体まわりで no-slip 条件、スパン方向の x - y 境界面では周期境界条件を採用した。

3次元解析は2次元解析領域をスパン方向へ $3.2D$ 広げた領域で解析を行う。スパン方向の要素幅は $0.05D$ とし、均等幅で64層の分割を行っている。2次元解析での総節点数ならびに総要素数は各々25,896、25,600である。スパン方向の要素幅は $0.05D$ とし、均等幅で64層の分割を行っている。従って、3次元解析での総節点数ならびに総要素数は各々1,683,240、1,638,400である。 x - y 平面での最小メッシュ幅は $0.0016D$ である。

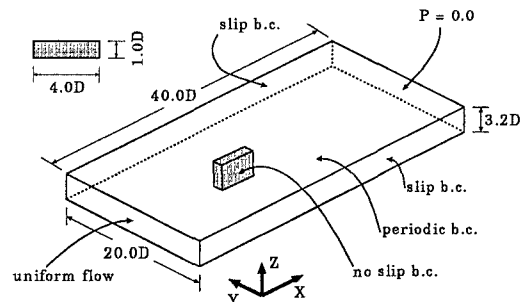


Fig.1 3次元解析における解析領域と境界条件図

4 解析結果

本研究では、剥離流の再付着点に主眼を置いていることから、まずは、矩形断面周りの圧力係数 (C_p) について検討する。Fig.2 に2次元及び3次元解析と岡島^[3]が行なった既存の風洞実験の結果による上側半分の平均圧力係数 (C_p) の分布図を示す。3次元解析による C_p 分布では、風洞実験で確認されている剥離流が再付着する B/D が2.8付近での表面圧力の上昇が明白に捕らえられていることが分かる。さらに、死水領域に存在する背圧係数 (C_{pb}) は、3次元解析ではほぼ一定分布をしているが、2次元解析は勾配を持つ分布を示している。物体前面の C_p 分布は、2次元及び3次元解析ともほぼ同等の分布を示している。

キーワード: 矩形断面, 流れの再付着, 圧力係数分布, 3次元数値流体解析

中央大学大学院理工学研究科 (〒112 東京都文京区春日 1-13-27, TEL:03-3817-1814, FAX:03-3817-1803)

しかし、剥離流の再付着点付近の表面圧力が高くなる傾向から、2次元解析では、風上側縁端から剥れた流れが、かなり手前に再付着と考えられる。また、物体背面中心での C_{pb} に関して、風洞実験の結果^[3]では-0.31、3次元解析では-0.32 とほぼ一致しているのに対し、2次元解析は-0.64 と2倍程度の大きな値を示している。

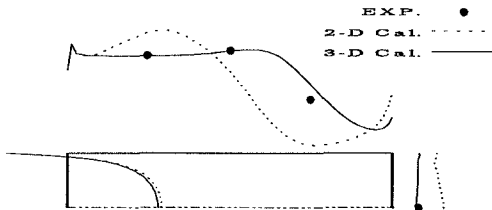


Fig.2 上側半分の平均圧力係数 (C_p) の分布図

Fig.3 及び 4 に 2 次元及び 3 次元解析での Re 数が 3000 における瞬間値の圧力コンター図を示す。3 次元解析では風洞実験により確認されている剥離流の再付着点 $B/D \approx 2.8$ 近傍に再付着している。しかし、2 次元解析では低圧部が風上側縁端近傍に存在し、そのまま断面上を移動していく。この現象が、2 次元解析の空気力の過大又は過少評価ならびに不安定振動を引き起こすと考えられる。この結果は、2 次元解析は軸方向流が存在しないため、渦がそのまま移動し低圧部の評価誤差をおこすと考えられる。

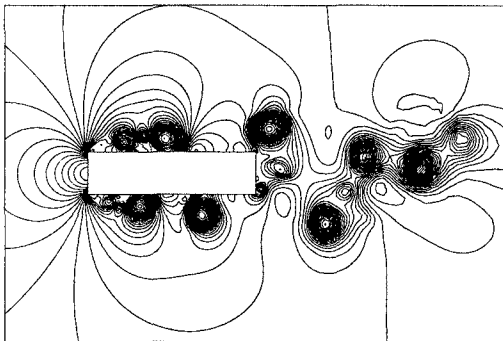


Fig.3 2次元解析における瞬間圧力コンター図

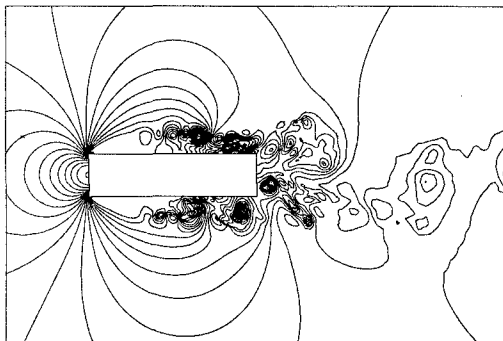


Fig.4 3次元解析における瞬間圧力コンター図

次に、Fig.5 及び 6 に煙風洞（三井造船（株）昭島研究所所有）での連続光による可視化写真と 3 次元解析での平均流脈線図を各々示す。両者ともに Re 数は 3000 である。

両者ともに近い流れの状態を示している。このときの 3 次元解析での平均圧力の最小位置は、風上側縁端から x 方向 $2.44D$ 、断面上部より y 方向に $0.34D$ である。

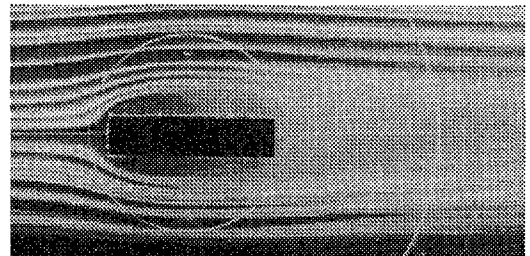


Fig.5 煙風洞実験による連続光可視化写真

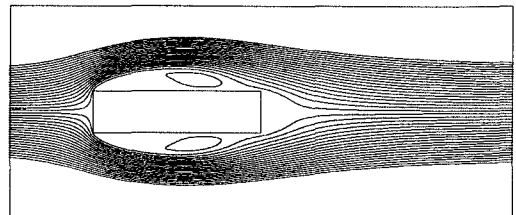


Fig.6 3次元解析による平均流脈線図

5 おわりに

本研究では、矩形断面の剥離流の再付着に主眼を置き、大規模 3 次元数値流体解析を行なった。2 次元解析や風洞実験の結果との比較より、次のことが得られた。

1. 3 次元解析による平均 C_p 分布では、風洞実験で確認されている剥離流が再付着する B/D が 2.8 付近での表面圧力の上昇が捕らえられた。
2. 3 次元解析での死水領域が存在する平均背圧係数 (C_{pb}) は、ほぼ一定分布を示した。
3. 2 次元解析は軸方向流が生じないため渦がそのまま移動し、低圧部の評価誤差をおこすと考えられる。
4. 2 次元解析では縁端から剥離した流れがすぐに巻き込みをおこし、剥離・再付着の現象は再現出来なかったが、3 次元解析では再現出来た。
5. 可視化風洞実験により確認されている剥離流の再付着点 $B/D \approx 2.8$ を 3 次元数値解析から確認することが可能になった。

以上のことから、偏平橋梁断面で問題となるフラッターや連成フラッターなどの構造と流れの連成解析を取り扱う場合には、3 次元数値解析が非常に有効な手段となり得ると思われる。

参考文献

- [1] 中口、橋本、武藤：矩形断面の柱の抗力に関する一実験、航空学会誌、Vol.16, No.168, 1968
- [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, 1997
- [3] 岡島、杉谷：矩形柱周りの流れ、九州大学応用力学研究所所報、第 53 号、1980