

I-14 下フランジに丸みをもつ三角形断面桁の 風による流体解析について

北海道大学工学部 正員 小幡 卓司
北海道大学工学部 窪田 公二
北海道大学名誉教授 正員 渡辺 昇
北見工業大学 正員 大島 俊之
㈱北海道土木設計 正員 大村 登喜夫

1. ま え が き

近年、橋梁技術の進歩ならびに材料強度の向上などにもない、橋梁はますます長大化する傾向にある。橋梁は長大化するにつれ風荷重が支配荷重になるばかりでなく、たわみ易い構造になり風により振動を発生するおそれが強くなる。強風は、時には橋梁に致命的な被害をもたらすことがあり、風によりもたらされた橋梁の事故としてはスコットランドのテイ(Tay)橋の落橋、およびアメリカのタコマナロウズ(Tacoma Narrows)橋の落橋が有名である。我国においても昭和30年代より橋梁における耐風性が指摘されるようになり、その結果平成3年に道路橋耐風設計便覧が制定され、一般の桁橋もその立地条件により耐風性の検討が必要となってきている。特に人道橋等の長スパンで比較的幅員が狭い橋梁の場合は、発散振動を起こす可能性が高くなるため耐風安定性の検討は重要な問題の一つである。

一般に耐風問題に関し、現時点では風洞実験が最も有効な手段であるが、風洞実験では多額の費用と時間を費やす場合が多い。実験前の段階で、ある程度断面形状などを特定できれば上記の問題を多少なりとも改善することが可能であろう。最近、コンピュータ技術は飛躍的に発展し、パソコン等でもかなり複雑な計算が可能になってきた。そのため、以前は大型計算機でのみ行われていた流体解析も、EWSやパソコンで十分解析できるようになりつつある。

以上の点を踏まえ、本研究は平成7年度利尻島内に竣工予定である湾内大橋について、その耐風安定性を検討する基礎的データを得るため、パソコンを用いた流体解析である“耐風数値シミュレーション”を試みた。湾内大橋は架設地点の特性からかなりの強風を受けるものと予想され、耐風安定性が懸念されている。そこで、本研究ではフラップやスカート等の付属物を用いるのではなく、断面形状そのものを改良し耐風性の向上を計ることを目的とし、耐風性向上を考慮した断面形状として考案された下フランジに丸みを持つ三角形断面について解析を行った。また、従来よく用いられている台形断面についても合わせて解析し、構造物近傍の流れの特性について比較検討を行った。さらに、風洞実験結果と対比し考察を加えた。したがって、本論文は以上の結果を報告するものである。

2. 数 値 解 析 理 論

一般に、非圧縮性粘性流体の2次元流れの解析を有限要素法によって行う場合、解法としては、パラメータとして流速と圧力を用いるものと、流れ関数と渦度を用いるものがある。本研究では後者を用いて解析を実施する。

二次元直交座標平面での運動は、Navier-Stokesの方程式を渦度 ω を用いて変形した以下の“渦度方程式”によって表される。

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} = \nu \nabla^2 \omega \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 ν は動粘性係数である。

Aerodynamics Analysis of Triangular Section Girder with Roundish Lower Flange.

by Takashi OBATA, Koji KUBOTA, Noboru WATANABE, Toshiyuki OSHIMA and Tokio OMURA.

渦度 ω は、

$$\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad \dots \dots \dots (2)$$

式(1)、式(2)へ流速 u 、 v と流れ関数 ϕ の関係式を代入すると、

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial x} - \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) = \nu \nabla^2 \omega \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial^2 y} = -\omega \quad \dots \dots \dots (4)$$

式(3)、式(4)をGalerkin法により離散化し、全体の要素について重ね合わせることで領域全体の離散化方程式が得られる。

$$[D] \phi - [M] \omega - \Gamma_2 = 0 \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$[M] \dot{\omega} + [A] \omega + \nu [D] \omega - \Gamma_4 = 0 \quad \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 $[D]$ は要素マトリックス、 $[M]$ は質量マトリックス、 $[A]$ は移流項の係数マトリックスであり、 Γ_2 、 Γ_4 は自然境界条件を与えるためのベクトル量である。

式(6)には時間微分 $\dot{\omega}$ が含まれているため、式(5)、式(6)を時間に関して積分し次式を得る。

$$[D] \phi^{n+1} = [M] \omega^n + \Gamma_2^{n+1} \quad \dots \dots (7)$$

$$[M] \frac{\omega^{n+1} - \omega^n}{\Delta t} + \nu [D] \omega^{n+1} = [M] \frac{\omega^n}{\Delta t} - [A(\phi^{n+1})] \omega^n + \Gamma_4^{n+1} \quad \dots \dots (8)$$

ここで、添字の n は n 段階目の時刻 t_n におけるそれぞれの値、 $n+1$ は $n+1$ 段階目の時刻 $t_{n+1} = t_n + \Delta t$ におけるそれぞれの値を表す。

式(7)、式(8)をプログラム化し、パソコンを用いて計算することにより流れ関数 ϕ と渦度 ω を得る。

通常、有限要素法ではいわゆるバンド幅が問題となることが多いが、本研究ではマトリックスの解法にスカイライン法を用いているため、バンド幅に依存せずに計算を行うことができる。よって、多少の工夫を加えることにより、比較的少ない労力で各種断面の解析が可能となる。

すなわち、図-1のように解析断面周辺の一定領域を除外して全領域を要素分割し、その一定領域の要素分割図を入れ換えることにより、任意の断面について解析することができ、パソコン等を用いる場合には非常に有効な手段であると言える。

3. 数 値 解 析

解析断面は、逆台形断面および下フランジに丸みを持つ三角形断面とし、また、本橋は冬期

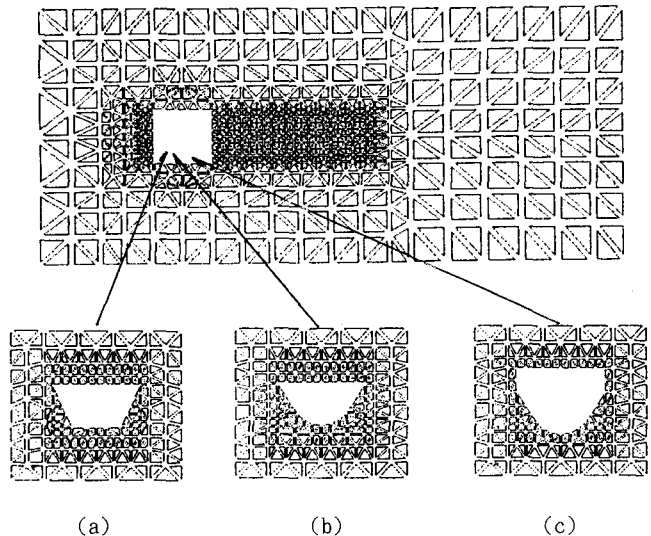
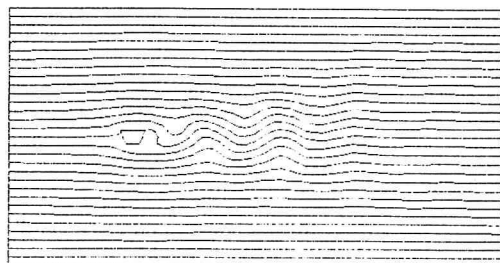
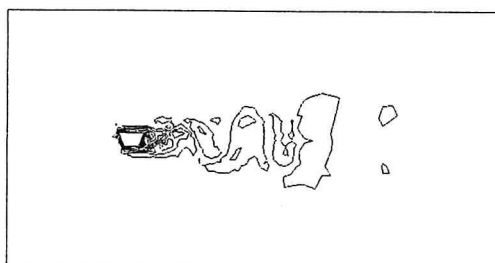


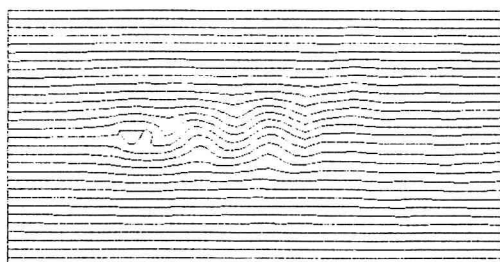
図-1 要素分割図



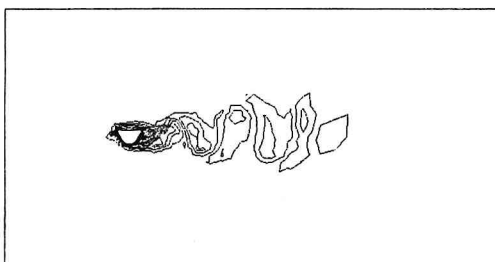
(a) 逆台形断面



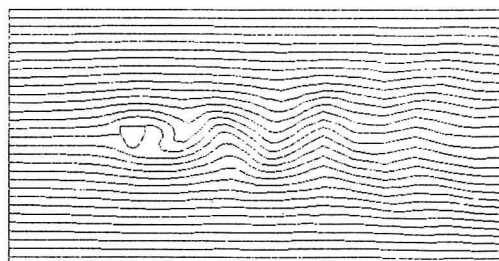
(a) 逆台形断面



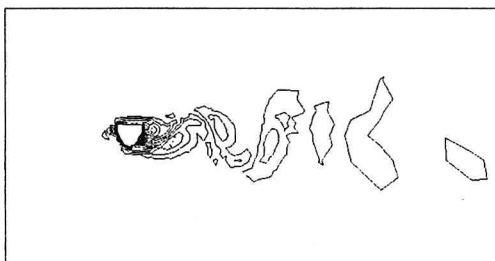
(b) 下フランジに丸みを持つ三角形断面



(b) 下フランジに丸みを持つ三角形断面



(c) (b)に積雪のある場合



(c) (b)に積雪のある場合

図-2 流れ関数の等値線

図-3 渦度の等値線

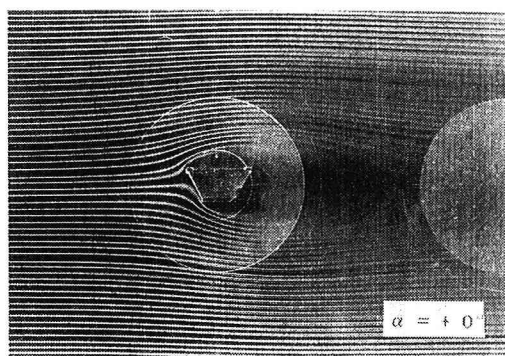


写真-1

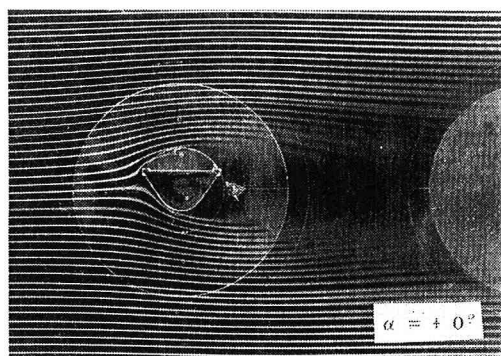


写真-2

間使用されないため、下フランジに丸みを持つ三角形断面に積雪を有した場合についても合わせて解析した。それぞれの断面形状は検討段階であることから、高欄等の付属物を省略した基本的なものとした。図-1中の(a)、(b)、(c)がこれらの断面周辺の一定領域を要素分割したものである。尚、断面近傍では流れの挙動をより精密に把握するため、要素分割を細分化した。

表-1にこれらの断面の節点数、要素数を示す。
Reynolds数は1200および10000とし、タイムステップ Δt は0.1(s)とした。

また、数値計算結果と風洞実験結果とを比較するためワークステーション（東芝 AS4050）を使用し、ソフトにはPV-WAVE(Ver. 4.2)を用いて流れの可視化を行った。画像処理は、各節点の計算結果を画面上のピクセルに分配し、流速の強弱を色彩で表現した。

4. 解析結果

計算結果の一例を図-2、図-3に示す。図-2は各種断面の流れ関数の等値線であり、図-3は渦度である。写真-1、写真-2に迎角0°の場合の風洞実験結果を示す。

図-2および図-3より、乱れが発生している範囲が逆台形断面に比べ下フランジに丸みを持つ三角形断面は狭く、風の影響は比較的低いと思われる。写真-1、写真-2からも同様な傾向が認められ、解析結果がほぼ妥当であると推定される。また、下フランジに丸みを持つ三角形断面に積雪を有した場合は、風に対面する面積が大きくなり、かなり乱れを生じていることがわかる。

尚、風洞実験は解析断面に迎角 α を設け $\alpha = 0^\circ、4^\circ、8^\circ$ の3 Typeについて実施された。逆台形断面は $\alpha = 4^\circ、8^\circ$ で大きな渦励振が発生し耐風性に問題があることが確認された。下フランジに丸みを持つ三角形断面は3 Typeすべてにおいて渦励振も発散振動も殆ど発生しておらず、優れた断面であると言える。この様に実験結果からも、風の乱れは逆台形断面に比べ下フランジに丸みを持つ三角形断面が小さいことがわかる。したがって、耐風数値シミュレーションは、耐風安定性検討の基礎的データを得るための有効な手段であると考えられる。

5. あ と が き

以上のように、本研究では数種の断面形状に対し解析を行い、風洞実験と比較することにより耐風数値シミュレーションの妥当性を検討した。

迎角0°の場合には、風洞実験における逆台形断面と下フランジに丸みを持つ三角形断面では、前者がわずかに耐風性が悪いという結果に留まっているにもかかわらず、耐風数値シミュレーションからは、両者の有意な差がある程度判断できるとと思われる。よって、迎角を設けた場合について解析を行えば、解析結果に顕著な差が現れると推測される。従って、パソコンを用いた解析でも、耐風安定性検討の基礎的データを得る手段として、耐風数値シミュレーションは有効であると考えられる。

最後に、本研究で用いた風洞実験結果は、北海道稚内土木現業所の好意により提供していただいたものであり、関係諸氏にこの場を借りてお礼を申し上げる。また、この研究に関して貴重な御助言をいただいた、北海道大学 佐藤浩一教授、林川俊郎助教授、平沢秀之助手、ならびに、解析結果を画像化する際に御助力いただいた、北見工業大学 三上修一助手に対し、深い謝意を表す次第である。

<参 考 文 献>

- 1) Hirasawa, H, Watanabe, N, Kon, C, Shinozaki, K : Analysis and Experiment of Triangular Cross Section Girder with Roundish Lower Flange, Proceedings of The Fourth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, pp. 359-364, 1993. 2) 平沢秀之, 渡辺昇, 今千代士, 大村登喜夫 : 下フランジに丸みのある三角形断面桁の開発的研究, 土木学会第47回年次学術講演会概要集第1部門, pp. 320-321, 1992. 3) 佐藤浩一, 渡辺昇, 小幡卓司, 井上稔康 : 一次元配列のICCG法とスカイライン法のパソコンへの適用について, 土木学会北海道支部論文報告集第46号, pp. 13-18, 1990. 4) 大西和榮, 林健次, 遠山洋, 二之宮弘 : パソコンによる流れ解析, 朝倉書店, 1986. 5) 川原睦人 : 有限要素法流体解析, 日科技連出版社, 1985. 6) 日本道路協会 : 道路橋耐風設計便覧, 丸善, 1991.

表-1 各断面の節点、要素数

	節点数	要素数
(a) 逆台形断面	609	1144
(b) 下フランジに丸みを持つ三角形断面	617	1160
(c) (b)に積雪のある場合	595	1112