

I-A 158 ALE 有限要素法解析に基づく偏平箱桁断面の非定常空気力解析

中央大学 学員 渡邊 茂 中央大学 正員 平野 廣和
三井造船 正員 林 健一 三井造船 正員 池ノ内 昌弘

1 はじめに

吊橋や斜張橋に代表される大型橋梁は、構造がフレキシブルであるため、風の作用によって様々な空力応答特性を示す。従って、計画・設計の段階から個々の断面における色々な風洞試験がその都度繰り返され、かなりのデータの蓄積も進んでいる。しかしながら、風洞試験は実際に架橋されるために設計された断面に対するものが主であり、断面の一般的空力特性を把握し、次の機会へ応用を計るには不十分なことが多い。

一方、急速な計算機性能の向上に伴い数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics) 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、断面形状等の決定までの予備的照査等^[1]に活用されるに至っている。近い将来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。

このような背景から、本論文では、箱桁断面補剛桁橋梁の耐風設計技術の確立を目指すために、風洞試験における強制加振振動法の概念を取り入れた数値流体解析により、直接非定常空気力を抽出しようとするものである。具体的には、ALE 有限要素法に基づく数値流体解析手法により、一様な流れの中で物体が強制加振された状態で、振幅ならびに加振周期を変化させた場合の非定常空気力を導出するものである。さらに、大型風洞で行われた既存の実験結果^[2]との比較も行う。

2 基礎方程式

ALE 記述による Navier - Stokes の運動方程式と連続式は次のように表される。

$$\dot{u}_i + (u_j - w_j)u_{i,j} + p_{,i} - \frac{1}{Re}(u_{i,j} + u_{j,i}),_{,j} = 0 \quad (1)$$

$$u_{i,i} = 0 \quad (2)$$

ここに u_i は流速、 p は圧力、 Re はレイノルズ数である。また、 w_i は橋梁断面の移動速度であり、これにより有限要素節点が移動する。尚、ALE 手法では、式 (1) の運動速度を任意に選択することができる。

次に、物体の強制加振についてであるが、加振方向は流れに対して垂直方向で以下のような関数で与え、振幅および加振周期を変化させる。

$$y = A \sin(2\pi/V_r \times t) \quad V_r = \frac{U_0}{N_\eta D}$$

ここで、 A は加振振幅、 t は時間、 U_0 は代表流速、 N_η は物体の固有振動数、 D は桁高、 V_r は無次元風速をそれぞれ示す。

3 分離型法による離散化

運動方程式と連続式に分離型解法の一つである流速修正法を適用する。まず、式 (1),(2) を時間方向に離散化すると

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} + (u_j^n - w_j^n)u_{i,j}^n + p_{,i}^{n+1} - \frac{1}{Re}(u_{i,j}^n + u_{j,i}^n),_{,j} = 0 \quad (3)$$

$$u_{i,i}^{n+1} = 0 \quad (4)$$

となる。ここに、 Δt は微小時間、 n は時間ステップである。式 (3) から中間流速 $\tilde{u}_i$ として圧力項を取り除くと、

$$\frac{\tilde{u}_i - u_i^n}{\Delta t} + (u_j^n - w_j^n)u_{i,j}^n - \frac{1}{Re}(u_{i,j}^n + u_{j,i}^n),_{,j} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{u_i^{n+1} - \tilde{u}_i}{\Delta t} + p_{,i}^{n+1} = 0 \quad (6)$$

式 (6) の発散をとり、式 (4) の非圧縮条件を課すと、圧力ポアソン方程式 (7) が得られる。

$$p_{,ii}^{n+1} = \frac{1}{\Delta t} \tilde{u}_{i,i} \quad (7)$$

以上により、分離型法の考えに基づき、流速場と圧力場を分離することができる。尚、この解法は、一度中間流速 $\tilde{u}_i$ を求め、 $\tilde{u}_i$ を圧力 p^{n+1} によって修正することから流速修正法と呼ばれている。

4 数値解析手法の概要

4.1 橋梁断面のモデル化

数値流体解析で対象とする断面は、幅員・桁高比 $B/D = 8.0$ 、張り出しなしの扁平な断面とする。また、この断面は風洞実験^[2]の場合と同様に、高欄・地覆・横断勾配を省略するものとする。

解析領域は、図-1 に示すように断面の桁高 D を代表高さとして、鉛直方向に $19D$ 、水平方向に $42D$ とした。この領域内に、左端から $13D$ の位置に補剛桁の回転中心が来るように配置した。

迎角は、 $\alpha = +5^\circ$ を中心とし、これらの断面まわりを三角形 1 次要素を用いて分割し、ここでの総節点数は 23,400、総要素数は 45,920 である。尚、レイノルズ数は $Re = 1,000$ とした。

境界条件は、解析領域上流端から一様な U_0 の風が吹き込むとし、上下の境界外に流れが出ない slip 条件とした。また、出口境界では、トラクションフリーの条件とした。

nodes 23400
elements 45920

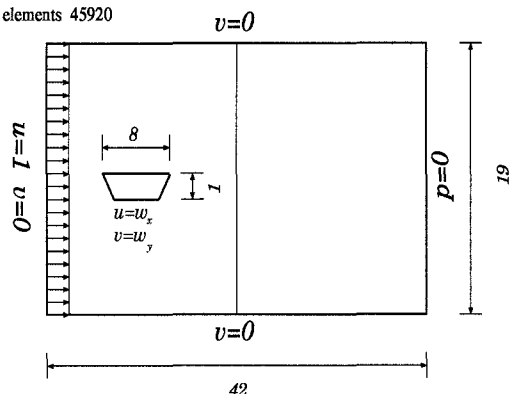
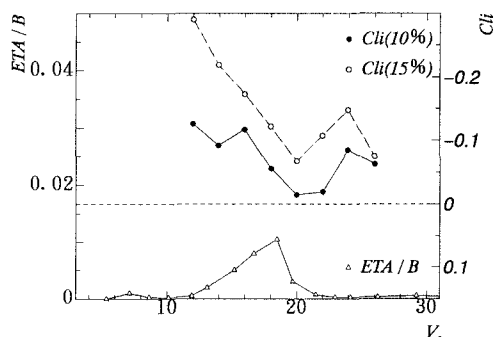


図-1 解析領域と境界条件

図-2 無次元流速 V_r に対するたわみと C_{li} との関係

5 解析結果

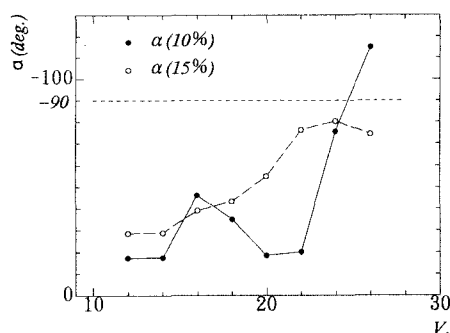
5.1 強制振動解析

ここでは、一様流中での迎角 $\alpha=+5^\circ$ で強制加振振動による非定常空気力の抽出解析を行った。数値解析は、無次元流速 V_r を変化させることにより強制加振周期を色々変化させて行った。具体的には、風洞実験結果^[1]から得られているたわみの渦励振振動発生予想風速 $V_r=18.0\sim 20.0$ 付近を中心として、 $V_r=12.0, 14.0, 16.0, 18.0, 20.0, 22.0, 24.0, 26.0$ の8種類の無次元流速とし、桁高に対して10%および15%の振幅の2種類をパラメータとして強制加振を行った。

非定常空気力の算出方法は、数値流体解析で一様流中での強制加振により得られた揚力の時系列データを、複素フーリエ変換を行うことにより、実数部 (C_{lr}) と虚数部 (C_{li}) とに分割することにより算出した。さらに、揚力の振幅波に対する位相遅れも併せて算出した。一般に、振幅は揚力係数の虚数部 (C_{li}) が正の値を示すならば発散傾向、ゼロ付近の値ならば定常振幅、負の値を示すならば減衰傾向をそれぞれ示すことが知られている。

図-2に風洞実験で得られたバネ支持による自動振動振幅と本解析で得られた C_{li} との関係を示す。これより C_{li} は発散傾向は示していないもの、両振幅共に V_r が20付近で振幅に対する減衰が一番小さくなっていることが分かる。この傾向は風洞実験で得られた定常振幅が約8%であるに対し、本解析ではこれより大きい強制加振振幅10%および15%を採用したために生じたと考えられる。よって、バネ支持試験による定常自動振動振幅域と本研究による強制加振の C_{li} の分布がほぼ同様な傾向を示している。

次に、揚力係数の振幅波に対する位相遅れの解析結果であるが、一般的な物理現象として外力の位相遅れが 90° 付近の時にその振動は定常振幅になれば共振すると言われている。図-3に示す通り振幅が10%および15%ともに、 V_r が24付近で位相遅れが 90° を示していることが分かる。また、 C_{li} の結果とは異なって10%および15%の結果の傾向に相違があることが分かる。即ち、この扁平な箱桁断面において揚力係数の振幅波に対する位相遅れに、振幅依存性があることが分かる。

図-3 V_r に対する揚力係数の振幅波に対する位相遅れ

6 おわりに

本論文で提案した一連の解析手法により、扁平な箱桁断面橋の基本的な空気力特性をつかむことができた。しかしながら、本解析ではバネ支持による自動振動解析を行っていないので、構造減衰は考慮に入れておらず、実際に渦励振振動の共振風速点を確認するまでに至っていない。従って、比較の為に流れと構造物との連成解析を行わなければならない課題は残されている。しかしながら、耐風設計上重要となる動的応答の問題に、数値流体解析の適用が可能であることが分かった。今後は本手法の確実性を証明するためにも、より多くの断面で検討する必要があると考えられる。

参考文献

- [1] 平野, 丸岡, 井上: 箱桁橋の耐風安定性検討への数値流体解析の適用, 第13回風工学シンポジウム論文集, pp561-566, 1994
- [2] 井上, 荒川, 池ノ内: 充腹断面の空力特性に関する実験的考察, 第7回風工学シンポジウム論文集, 1982