

偏平箱桁断面の空力応答特性に関する流体と構造との連成解析

Numerical Analysis of Fluid-Structure Interaction Problem
and Its Application to Aerodynamic Response Characteristics of Box Girder Section

平野 廣和*・渡邊 茂**・丸岡 晃***・林 健一****・池ノ内 昌弘†

Hirokazu Hirano, Shigeru Watanabe, Akira Maruoka, Ken-ichi Hayashi, and Masahiro Ikenouchi

*工博 中央大学助教授 総合政策学部(〒192-03 東京都八王子市東中野 742-1)

**中央大学大学院理工学研究科土木工学専攻(〒112 東京都文京区春日 1-13-27)

***工修 中央大学大学院理工学研究科土木工学専攻(〒112 東京都文京区春日 1-13-27)

****工修 三井造船(株)鉄構建設事業部技術部(〒196 東京都昭島市つつじが丘 1-1-50)

†工博 三井造船(株)事業開発本部技術本部 部長(〒104 東京都中央区築地 5-6-4)

This paper presents a finite element method for the analysis of a fluid-structure interaction problem, in which the fluid is treated as incompressible viscous flow, and a structure is idealized as a rigid body supported by elastic springs. The basic equations of this problem can be formulated in the simultaneous equation system which consist of the equations of fluid motion in the Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) description, continuity of fluid and motion of rigid body supported by elastic springs and dashpots. For the coupling of fluid and rigid body, the equilibrium and compatibility conditions are utilized. The ALE finite element method is employed to solve the flow field around structures, and the fractional step method is adopted for the time integration. The conventional Newmark's β method is applied for the equation of rigid body. To express the adaptability of this method, the vortex excited oscillation of box girder bridge is solved. The comparisons of the numerical results with the experimental results exhibits that the present method can be devoted to the safety design of the wind resistance of great structures.

Key Word : Numerical analysis, ALE Finite Element Method, Aerodynamic Stability, Vortex-excited oscillation

1. はじめに

吊橋や斜張橋に代表される大型橋梁は、剛性の低い柔構造物であることから、耐風設計に際しては慎重な検討を行う必要がある。道路橋耐風設計便覧¹⁾が提示された現在においても、最大支間長が200mを越えるような大型橋梁では、風洞実験を実施して耐風安定性を検討する必要がある。

ところで、大型橋梁に用いられることが多い比較的偏平な箱桁橋断面は、基本的に流れに対して鈍い形状のため、耐風工学的にはその形状・振動諸元等によっては、各種の問題を生ずることがある。バネ支持風洞試験を実施した場合、一般に低風速域においてはたわみとねじれの渦励振が、また高風速域においてはねじれのフラッターの発生が予想される。このため大型橋梁で比較的偏平な箱桁橋断面を採用した場合には、計画・設計の段階から各種の断面における色々な風洞試験がその都度繰り返されている。その結果、この種の断面におけるかなりのデータの蓄積も進んでいる。しかしながら、実施されている風洞試験は、実橋を対象としていることが多く、そのため高欄・地覆等の付い

た状態でのケース・バイ・ケース的な試験にとどまり、他の橋梁へそのまま適用するには問題が多いようである。そこで、断面を単純化し、その断面形状に着目して基本的な耐風特性を捕らえ、今後の橋梁に耐風設計の考え方を基本設計の段階から積極的に取り入れることが希求されている。

一方、近年の急速な計算機性能の向上に伴い数値流体力学(CFD : 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ている²⁾。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。しかしながら、実際の橋梁断面を扱った数値流体解析は、現状では静的な風荷重を求める研究が中心であり、動的な問題を扱った研究^{3)~6)}は少ないのが現状である。例えば、著者ら⁶⁾は、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、直接非定常空気を抽出し、たわみの渦励振発生が予想される風速域に関して検討を行い、基本的な空気力特性をつかんでいる。一方、風洞実験においてこの種の問題を検討する場合には、バネ支持風洞実験の自由

振動試験が中心である。この実験と同等のことを数値流体解析で行う場合には、流れの方程式と構造の方程式とを連成させて解析する必要がある。しかしながら、従来の連成解析の研究^{7)~10)}では、構造物が静止した状態から徐々に振動を生じるまでを解析したものであり、風洞実験のように一定振幅に加振をした後、自由減衰へ移行させる解析はあまり行われていないようである。このようなことから、数値流体解析もこの風洞実験手法に沿った解析を行う必要がある。

このような背景から、本論文では、文献⁶⁾での強制加振試験の解析に加え、バネ支持風洞実験における自由振動試験の概念を取り入れた流体と構造との連成解析を行うものである。これにより、静的状態・強制加振状態ならびに自由振動状態の3種類の関連した解析結果から、総合的に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、無次元風速をパラメータとして、一様な流れの中で箱桁橋断面が流れと直角方向に強制加振された後、自由減衰の状態での解析を行う。なお、本論文ではたわみの渦励振発生が予想される風速域に関して検討を行う。これにより、無次元風速と減衰率及び振幅との関連を算出し、併せて大型風洞で行われた既存の実験結果¹¹⁾との比較を行う。

2. 基礎方程式

2.1 流れの場の基礎方程式

自由振動状態での風の流れの場の基礎方程式は、ALE記述⁸⁾によるNavier-Stokesの運動方程式と連続式であり、次のように表される。

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho(u_j - w_j)u_{i,j} + p_{,i} - \mu(u_{i,j} + u_{j,i})_{,j} = \rho f_i \quad (1)$$

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

ここで、 u_i は流速、 p は圧力、 ρ は密度、 μ はせん断粘性係数、 f_i は外力をそれぞれ表す。また、 w_i は流れの中に置かれた補剛桁断面の流れに直角方向の運動速度であり、これにより有限要素節点が移動する。ALE記述では、式(1)の運動速度 w_i を任意に選択することができる。

2.2 構造物の運動の基礎方程式

本論文では、風洞実験手法の強制加振試験ならびにバネ支持実験における自由振動試験に着目して数値解析を行う。

(1) 強制加振試験

まず、構造物の強制加振状態についての構造物の運動方程式は、流れに対して鉛直方向に加振を行い以下

のような関数で与えることにより振幅および加振周期を変化させる。

$$y = A_0 \sin(2\pi/V_r \times t) \quad (3)$$

$$V_r = \frac{U_0}{N_\eta D} \quad (4)$$

ここで、 A_0 は加振振幅、 t は時間、 U_0 は代表流速、 N_η は加振振動数、 D は桁高、 V_r は無次元風速をそれぞれ示す。

(2) 自由振動試験

橋梁断面の運動方程式を導くに際し、次のような仮定を導入する。

1. 橋梁断面は剛体であり、それ自身は変形しない。
2. x, y 方向の並進変位 X, Y と重心まわりの回転変位 θ の3自由度とする。
3. 3自由度とも独立のバネおよびダッシュポットにより支持されている。

また、モデル概念図を図-1に示す。これらの仮定から、橋梁断面の運動方程式は次のように表される。

$$\mathbf{M}_{ij} \ddot{X}_j + \mathbf{C}_{ij} \dot{X}_j + \mathbf{K}_{ij} X_j = \mathbf{F}_i \quad (5)$$

ここで、 X_i は変位 $X_i = \{X, Y, \theta\}$ 、 $\mathbf{F}_i$ は流体力による外力 $\mathbf{F}_i = \{D, L, M\}$ 、 $\mathbf{M}_{ij}$ は質量行列、 $\mathbf{C}_{ij}$ は減衰行列、 $\mathbf{K}_{ij}$ は剛性行列を示し、それぞれは対角行列である。また、流体力による外力 $\mathbf{F}_i$ は、次の式により求められる。

$$D = \int_{\Gamma_s} (\sigma_{xj} n_j) d\Gamma \quad L = \int_{\Gamma_s} (\sigma_{yj} n_j) d\Gamma$$

$$M = \int_{\Gamma_s} \{-l_y (\sigma_{xj} n_j) + l_x (\sigma_{yj} n_j)\} d\Gamma \quad (6)$$

ここで、 Γ_s は橋梁断面表面、 n_i は橋梁断面まわりの外向き法線ベクトル、 l_i は構造物の重心から境界 Γ_s までの距離を表す。また、 σ_{ij} は以下に示す応力テンソルである。

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu(u_{i,j} + u_{j,i})$$

ここで、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタ関数を表す。

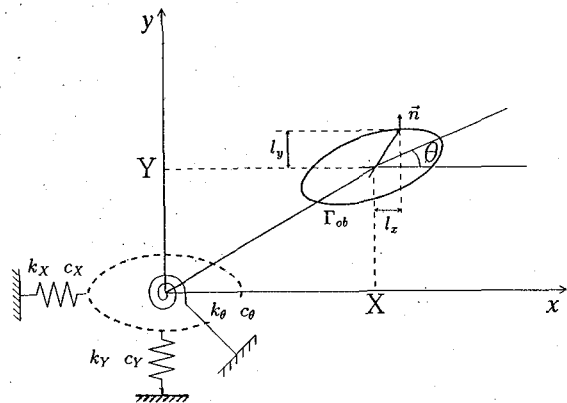


図-1 振動モデル概念図

3. 数値解析の手法

3.1 基礎方程式の離散化

(1) 流れの方程式

流れの基礎方程式(1),(2)の離散化手法として、分離型有限要素法解法の一つである流速修正法¹²⁾を適用する。式(1),(2)を時間方向に離散化すると

$$\rho\left(\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t}\right) + \rho(u_j^n - w_j^{n+1})u_{i,j}^n + p_{i,i}^{n+1} - \mu(u_{i,j}^n + u_{j,i}^n)_{,j} = \rho f_i^n \quad (7)$$

$$u_{i,i}^{n+1} = 0 \quad (8)$$

である。ここに、 Δt は微小時間増分量、 n は時間ステップである。節点移動速度 w_i は、節点座標 x_i の変化量から以下の式で求められるものとする。

$$w_i^{n+1} = \frac{x_i^{n+1} - x_i^n}{\Delta t} \quad (9)$$

中間流速 $\tilde{u}_i$ を導入することにより、運動方程式(7)は圧力項を取り除いた運動方程式(10)と式(11)の2つに分けることができる。

$$\rho\left(\frac{\tilde{u}_i - u_i^n}{\Delta t}\right) + \rho(u_j^n - w_j^{n+1})u_{i,j}^n - \mu(u_{i,j}^n + u_{j,i}^n)_{,j} = \rho f_i^n \quad (10)$$

$$\rho\left(\frac{u_i^{n+1} - \tilde{u}_i}{\Delta t}\right) + p_{i,i}^{n+1} = 0 \quad (11)$$

式(11)の発散をとり、式(8)の非圧縮条件を課すと、圧力ポアソン方程式(12)が得られる。

$$p_{i,i}^{n+1} = \frac{\rho}{\Delta t} \tilde{u}_{i,i} \quad (12)$$

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。

式(10), (11), (12)の方程式の流速 u_i 、圧力 p の両者に1次の形状関数を用いて、通常のガラーキン法による離散化を行えば、次の有限要素方程式を得ることができる。

$$\rho M \tilde{u}_i = \rho M u_i^n - \Delta t \{ \rho K (u_j^n - w_j^{n+1}) u_i^n + S u_j^n - \hat{\Sigma}^n \} \quad (13)$$

$$A p^{n+1} = -\frac{\rho}{\Delta t} H_2 \tilde{u}_i \quad (14)$$

$$\rho M u_i^{n+1} = \rho M \tilde{u}_i + \Delta t H_1 p^{n+1} \quad (15)$$

ここで、 M は質量、 K は対流、 S は粘性、 H_1 , H_2 は微分作用素のそれぞれに関するマトリックスを表す。また、各マトリックスは、形状関数 Φ_α を用いると以下の式に表される。なお、本解析は2次元の解析であるので、添字 i, j, k は1, 2の値をとるものとする。

$$M = \int_V \Phi_\alpha \Phi_\beta dV, \quad A = \int_V \Phi_{\alpha,i} \Phi_{\beta,i} dV,$$

$$S = \int_V \frac{\Delta t}{2} (u_j^n - w_j^{n+1}) u_k^n \Phi_{\alpha,j} \Phi_{\beta,k} dV \delta_{ij} + \mu \int_V (\Phi_{\alpha,k} \Phi_{\beta,k} \delta_{ij} + \Phi_{\alpha,j} \Phi_{\beta,i}) dV,$$

$$H_1 = \int_V \Phi_{\alpha,i} \Phi_\beta dV, \quad H_2 = \int_V \Phi_\alpha \Phi_{\beta,i} dV,$$

$$K = \int_V \Phi_\alpha \Phi_\beta \Phi_{\gamma,i} dV, \quad \hat{\Sigma} = \int_\Gamma \Phi_\alpha \sigma_{ij} n_j d\Gamma,$$

$$\sigma_{ij} = -p \delta_{ij} + \mu (u_{i,j} + u_{j,i})$$

ここで、 V は解析領域全体、 Γ は物体表面の境界、 n_j は物体まわりの外向き法線ベクトルをそれぞれ表す。

(2) 構造物の運動方程式

構造物の運動方程式(5)は、本来ならば流れの基礎方程式と連立して解くべきであるが、ここではアルゴリズムの単純化のため、式(6)により求められる流体力による外力を前時間ステップにより近似することにより次のように取り扱う。

$$M_{ij} \ddot{X}_j^{n+1} + C_{ij} \dot{X}_j^{n+1} + K_{ij} X_j^{n+1} = F_i^n \quad (16)$$

本論文では、この方程式の数値解析方法として、Newmark's β 法を適用する。

流れと構造物との連成解析のアルゴリズムをまとめると、以下のようになる。

1. 構造物の変位 X_i^{n+1} を求める。
2. 構造物の変位 X_i^{n+1} から、節点座標 x_i^n を x_i^{n+1} に移動させ、節点移動速度 w_i^{n+1} を求める。なお、節点の移動量は、物体表面では変位量を、領域境界上では変位量なしとし、その間の節点では、要素形状が過大にならないように $k U_{i,jj} = 0$ を定義する。ここで U は変位量、 k は各要素毎に設定したパラメータであり、 k は要素面積が小さい所では大きな値となるように設定している。
3. 更新された節点座標 x_i^{n+1} により、流れの場の流速 u_i^{n+1} 、圧力 p_i^{n+1} 、また流体力 F_i^{n+1} を求める。

3.2 解析の手順

流れと構造物が連成した自由振動状態の解析を行うに際し、図-2に示す手順に従って3種類の解析を順次行う。

(1) 静的状態の解析

図-2の①に示す橋梁断面を固定した静的状態の解析を行う。ここでは、式(1)の w_i を0.0として解析を行い、これにより橋梁断面が静止している状態での流れの状態と橋梁断面に作用する流体力を求める。この解析は、変動揚力が定常的な振幅となるまで続ける。なお、この流体力から静的空気力が算出されるので、複数の迎角の解析を行えば平均揚力係数の勾配から発散振動の有無を推定することができる。

また、①の解析は、バネ支持風洞実験において規定の風速まで風洞内風速が安定するまで、模型を固定しておくことに相当している。

(2) 強制加振状態の解析

①の結果を初期値として、②の強制加振時の解析を行う。基礎方程式としては、*ALE*記述された式(1)、(2)を用いる。ここでは、加振振幅を桁高 D に対して15%(無次元振幅 $\eta/B=0.01875$)とし、無次元風速 $V_r=U_0/N_\eta D$ をパラメータとして、橋梁断面を流れと直角な方向に式(3)により30周期分の強制加振を行った。本論文では、強制加振振動数 N_η を変化させることにより無次元風速の値を変化させることとする。この解析により、橋梁断面が強制加振されている状態での流れの状態と橋梁断面に作用する非定常空気力を求める。

ところで、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(Cl_r)と虚数部(Cl_i)とに分割することにより算出する。これより振幅は揚力係数の虚数部(Cl_i)が正の値を示すならば発散傾向を、ゼロ近傍ならば定常振幅を、負ならば減衰傾向を示す。

②の解析は、バネ支持風洞実験において橋梁断面を所定の振幅・振動数にて強制加振している状態に対応している。

(3) 自由振動状態の解析

②で求められた流れの場合、橋梁断面に作用する空気力および運動速度を初期値として③の解析を行う。この解析は流れの場合の基礎方程式として式(1)、(2)を構造の運動方程式としては式(5)を用いる、流れと構造との連成解析である。これにより自由減衰状態での橋梁断面の振幅の減衰あるいは発散の様子を解析する。

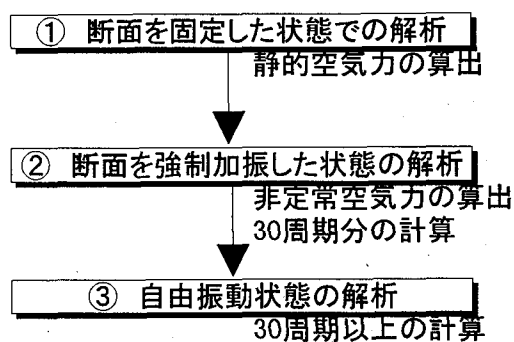


図-2 解析の手順

4. 橋梁断面のモデル化

数値流体解析で対象とする橋梁断面は、幅員・桁高比 $B/D=8.0$ 、ウェブの傾斜角 $\beta=60^\circ$ 、張り出しなし

の偏平な断面とする。この断面は風洞実験¹¹⁾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-3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 $19D$ (閉塞率5.3%)、水平方向に $42D$ とし、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た。ここでの総節点数は23,400、総要素数は45,920である。また、断面近傍では、境界層厚を考慮してこの中に節点が3~4点入るように配置を行った。ここでのレイノルズ数は $Re=1,000$ である。なお、レイノルズ数は実際の風洞実験と比較して、2オーダー程度低い値となっているが、ここで扱う橋梁断面が角張った *Bruff* な断面であるので、流れの剥離位置がレイノルズ数に依存せず固定されていると仮定して、計算効率を優先させてこの値を決定した。なお、この仮定は、従来の風洞実験で採用されているものである。

境界条件は、図-3に示す解析領域上流端から一様な流速 U_0 の風が吹き込むものとし、上下面では境界外に流れが出ない *slip* 条件($v=0.0$)としている。圧力のポアソン方程式の境界条件は、下流端で圧力の基準値として $p=0.0$ を与え、その他の境界では $\partial p/\partial n=0.0$ とする。また、断面表面では、静的状態の解析では *non-slip* 条件を、その他の解析では構造の運動方程式を解くことにより得られた運動速度を与える。

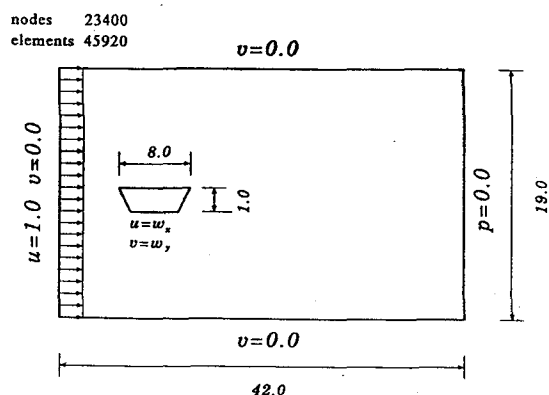


図-3 解析領域と境界条件

自由振動状態での構造の運動方程式を解析するのに用いたパラメータは、風洞実験¹¹⁾によるものを用いた。各パラメータは表-1の通りである。なお、本論文では、たわみ振動に着目していることから、式(5)に示す流れに対して水平方向(X)及び回転方向(θ)に関してはバネ定数を十分に大きくすることにより拘束の条件とし、鉛直方向(Y)の自由度のみを与える。

ところで、本論文では、流入流速 U_0 を一定として、加振振動数 N_η を変化させることにより無次元風速 V_r

を変化させている。ここで、既往の風洞実験のように流入流速を変化させる手法を用いなかったのは、流速の変化に伴ってレイノルズ数が変化すると、補剛桁断面表面の最小メッシュ間隔をそれに併せて変化させることが必要となる場合が生ずる。このため、最小メッシュ間隔が新たな解析上のパラメータとなる可能性があるため、これを避けるために加振振動数を変化させる手法を選択した。

表-1 実験及び解析諸元

風 洞 実 験		
重量(kgf/m)	振動数(Hz)	対数減衰率
6.872	2.061	0.0203
数 値 解 析		
質量($\frac{m}{\rho D^2}$)	振動数	対数減衰率
1339.2	0.0417~0.0833	0.0203

5. 結果と考察

5.1 静的状態の解析

本論文で取り上げる偏平な補剛桁断面は迎角 $\alpha=+5^\circ$ では渦励振振動を生ずるが、この迎角では発散振動(ギャロッピング振動)は生じないことが風洞実験¹¹⁾により確かめられている。これを数値解析の面から確認するために、断面が固定された状態で迎角 $\alpha=0^\circ, +5^\circ$ での平均揚力係数ならびにこの間の勾配を求めた。一般に、迎角 $\alpha=0^\circ$ を中心とした平均揚力の勾配が負となった場合、発散振動が生じる可能性が高いことが知られている。

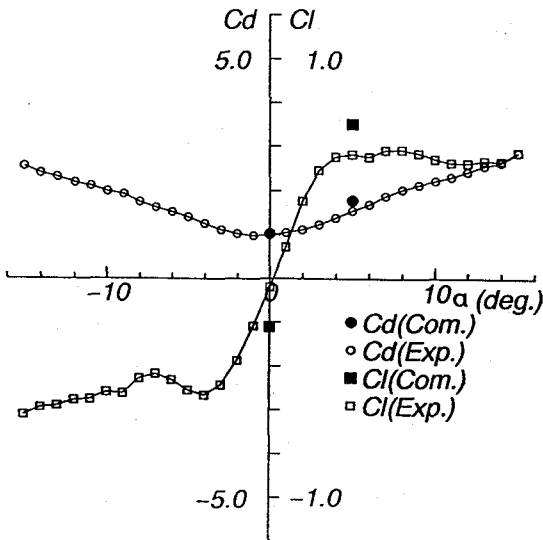


図-4 迎角 α に対する抗力・揚力係数の比較

図-4に、解析で得られた平均揚力・平均抗力ならびに静的3分力風洞実験で得られた結果との比較を示す。

揚力・抗力ともに実験結果と同様の傾向を示していることがわかる。また、迎角 $\alpha=0^\circ$ と $+5^\circ$ の間の平均揚力は正の勾配を示している。これより、解析結果からも、発散振動は生じないと推定される。

揚力の変動周期と後流渦周期とが同一になると仮定すれば、揚力係数の時刻歴からストローハル数に相当する値を計算することができる。この考え方をを用いて、図-5に迎角 $\alpha=+5^\circ$ の場合の揚力係数の卓越周波数成分(渦の発生周波数に相当)を示す。なお、データ数は、定常に達したと考えられる所から、無次元時間0.01毎に32,768個使用した。ここで、縦軸はパワー、横軸は周波数であり、無次元風速の逆数($1/V_r$)に相当する。この図より、周波数が0.050, 0.071, 0.085, 0.098及び0.154付近でピークを示している。これより無次元風速を求めると、 $V_r=20.0, 14.1, 11.8, 10.2, 6.5$ のそれぞれの風速に相当している。耐風設計便覧¹⁾によると、ここで算出した風速域が、たわみの渦励振振動を発生する風速と予想される。一方、風洞実験¹¹⁾によると、無次元風速 $V_r=7.0$ 付近で小さな定常振幅が、 $V_r=12.0$ から20付近にかけて渦励振振動が発生し、 $V_r=18.5$ 付近で最大の定常振幅($\eta/B=0.01$)が得られている。これらのことより、静的な解析結果から得られた渦励振振動の発生予想風速が、風洞実験で得られた傾向とほぼ一致していることが判る。

以上の結果から、本論文ではたわみ渦励振振動発生風速域にのみ着目して解析を行うこととする。

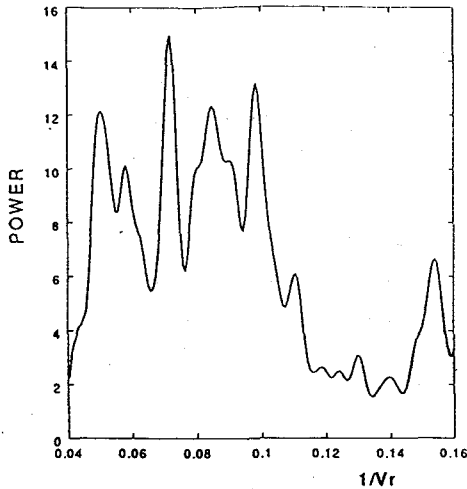


図-5 揚力係数の卓越周波数成分

5.2 強制加振時の解析

一様流中での迎角 $\alpha=+5^\circ$ の強制加振による解析を行い、この時の非定常空気力の抽出解析を行った。

数値解析は、前述の通り、無次元風速 V_r を変化させることにより強制加振振動数を変化させて行った。具体的には、風洞実験結果¹¹⁾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、 $V_r = 12.0, 14.0, 16.0, 18.0, 18.5, 19.0,$

20.0, 22.0, 24.0 の9種類の風速とし、桁高Dに対して15%($\eta/B=0.01875$)の加振振幅として、それぞれ30周期分の解析を行った。

図-6にバネ支持風洞実験で得られた定常振幅と本解析で得られた非定常揚力係数の虚数部 Cl_i との関係を示す。 Cl_i は、全ての風速域において負の値を示していることから、ここでの風速域では発散する振動を生ずる傾向を示していない。これは2次元解析であることから、抗力を正確に評価できていないこと¹³⁾に起因していると推測される。しかし、 $V_r=20.0$ において Cl_i が最大となることは、 $V_r=20.0$ 付近において空力減衰が最小となることを示している。一方、風洞実験¹¹⁾では、 $V_r=18.5$ 付近で定常振幅が約8%($\eta/B=0.01$)となる結果が得られている。若干の風速の差はあるものの、本解析で得られた傾向が、渦励振発生風の風速域を示唆しているものと推定される。

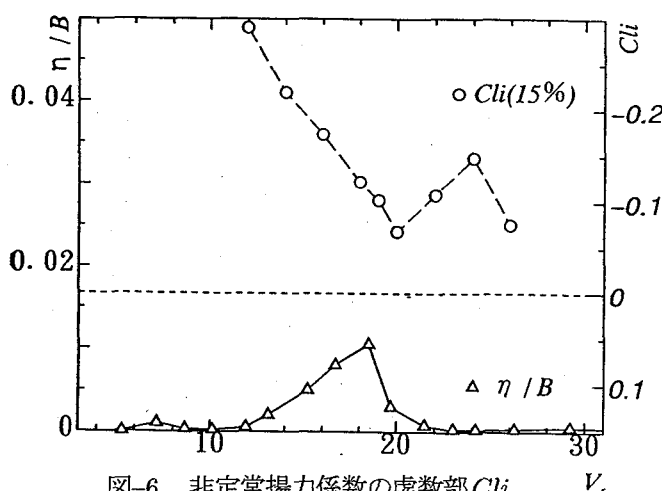


図-6 非定常揚力係数の虚数部 Cl_i 及び風洞試験¹¹⁾での定常振幅

5.3 自由振動状態の解析

前節の強制加振状態の解析結果から得られた非定常空力から、無次元風速 $V_r=18.0\sim 20.0$ の間にたわみの渦励振振動が存在することが推定された。この結果を受け、本節では、前節の結果を初期値として、 $V_r=12.0, 14.0, 16.0, 18.0, 18.5, 19.0, 20.0, 22.0, 24.0$ の9種類の風速での自由振動状態での解析を行った。

図-7は、解析結果と風洞実験¹¹⁾にて得られた減衰率の変化とを比較した図である。ところで、風洞実験では橋梁模型の基準振幅を弦長の1/200としているので、数値解析もこれに従って基準振幅を $\eta/B=0.005$ としている。次に図-8は、同様に定常振幅を比較した図である。ここでの定常振幅とは、過渡減衰が十分に減衰した後の最小振幅と最大振幅との平均である。

図-7より、数値流体解析結果の対数減衰率 δ は、 $V_r=12.0$ から14.0にかけていったん増加した後、減少傾向を示し、 $V_r=18.5$ 付近で最小値を示しており、こ

こで若干の負の値となっている。さらに風速が増加するにつれて対数減衰率は増加する傾向を示している。ここでの、対数減衰率がいったん増加した後、減少して最小値をとる傾向は、風洞実験結果から得られた事実と一致している。

図-8より、数値流体解析の定常振幅は、 $V_r=12.0$ から徐々に増加した後、 $V_r=18.5$ 付近でほぼ基準振幅値に近い $\eta/B=0.005$ を示す。さらに風速が増加すると、平均振幅は減少している。ここでの傾向も風洞実験結果より得られた事実と一致している。

ところで、両者の結果の傾向は一致しているが、対数減衰率および平均振幅の値そのものの大きさには差が生じている。ここでの値の差が生じた要因としては、文献^{13)~15)}でも指摘されている、両者のレイノルズ数の差と流れの3次元性が考えられる。

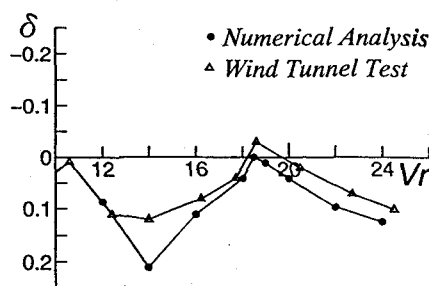


図-7 減衰率の変化 ($V-\delta$)

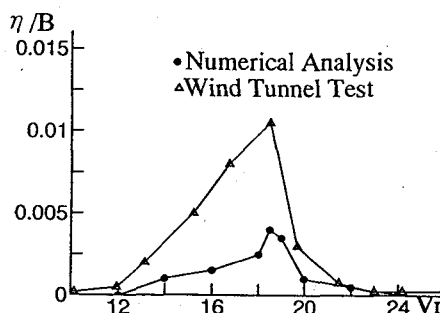
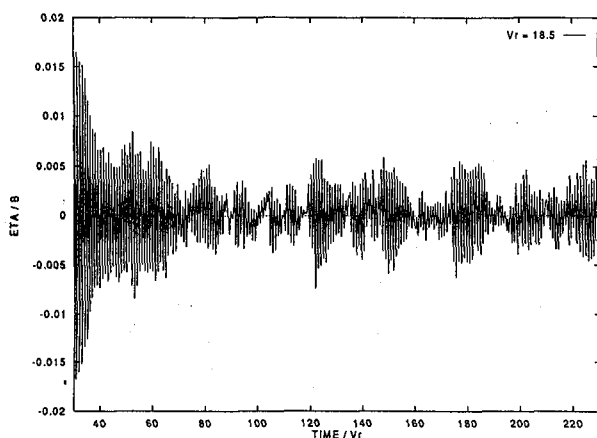


図-8 定常振幅の変化 ($V-A$)

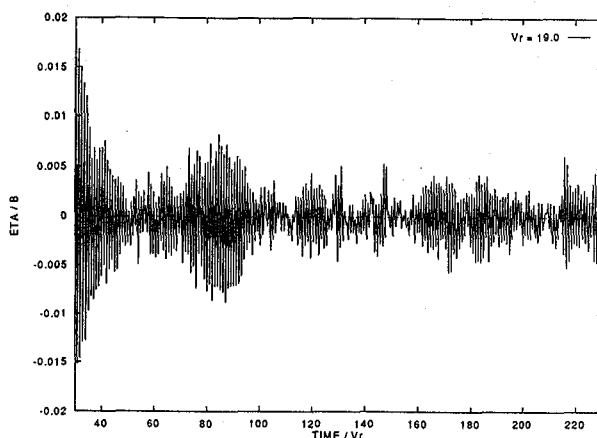
図-9に渦励振振動発生風速付近と考えられる無次元風速 $V_r=18.5, 19.0, 20.0$ での30周期から最大230周期まで(30周期までは初期条件としての強制加振)の減衰波形を示す。ここで縦軸は無次元変位(η/B)、横軸は周期を表している。 $V_r=18.5$ では基準振幅付近まで減衰した後、ベル状のビート形状を示す振幅となっている。そして、 $V_r=19.0$ でとなると減衰傾向は強まるが、ここでもビート状態を示している。さらに風速が増加した $V_r=20.0$ では、振幅が小さくなる傾向を示している。

これらの結果から、 $V_r=18.5$ 付近に、渦励振振動発生風速が存在すると考えられる。なお、風洞実験結果

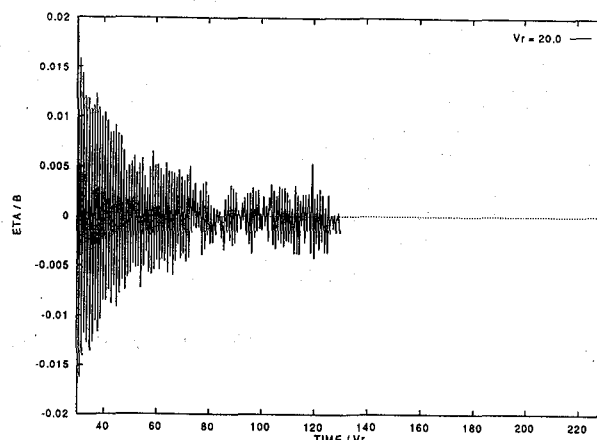
でも、 $V_r=18.5$ 付近で渦励振が発生することが示されている。



$V_r=18.5$



$V_r=19.0$



$V_r=20.0$

図-9 減衰波形図

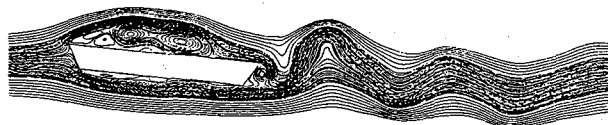
5.4 渦励振振動発生域での流れの状態

図-10 に渦励振域と考えられる無次元風速 $V_r=18.5$ および比較のためにその域以外の無次元風速 $V_r=20.0$ の瞬間の流線図を示す。

これらの図より、渦励振発生域と考えられる無次元風速 $V_r=18.5$ では、橋梁断面上部前縁で剥離した渦が、床版上で大きく発達している。それに対して、渦励振発生域外の無次元風速 $V_r=20.0$ では、渦がつぶれた形となり発達していない。特に断面後方の渦の様子があまり鮮明ではないことがわかる。ところで、橋梁断面下部後端から剥離した小さな渦が見られるが、この渦の周波数は約 0.098 であり、静的状態の解析、強制加振状態の解析及び自由振動状態の解析のどの結果にも揚力係数の卓越周波数成分の一つと存在している。また、この渦の周波数は、図-6 に示すバネ支持風洞実験で得られている定常振幅が低風速側から生じる位置の周波数に一致しており、さらに辺長比が 1:8 の角柱断面のストローハル数に近い値を示している。従って本論文で取り上げたような再付着型の偏平断面では、橋梁断面下部後端から剥離した小さな渦の周波数はあまり渦励振振動には影響せず、再付着成分が大きく影響していることが推定される。



$V_r = 18.5$



$V_r = 20.0$

図-10 渦励振風速域での流線図

6. おわりに

本論文で提案した一連の解析手法から、次のようなことがわかった。

1. 耐風設計上重要となる動的応答の問題に、流体と構造との連成解析である ALE 有限要素解析手法

に基づく強制加振状態の解析及びこの結果を初期値とした自由振動状態の解析手法が適用可能であることがわかった。

2. 強制加振状態の解析結果から得られた非定常空気力から求めた揚力係数の虚数部が、風洞実験での渦励振発生風速域で、最大値を示すことがつかめた。
3. 自由振動状態の解析で、渦励振振動発生風速域では減衰率が負となり、かつ定常振幅が最大となることがつかめた。さらに、渦励振の発生風速、減衰率、定常振幅のそれぞれの値は実用に耐えられる範囲で風洞実験結果と近い値を示している。
4. 偏平箱桁断面のように再付着型の断面では、断面下部後端から剥離した小さな渦の周波数はあまり渦励振振動には影響せず、再付着成分が大きく影響していることが数値解析からも推定される。

本論文で提案した流体と構造との一連の連成解析手法により、偏平箱桁断面の渦励振域での基本的な空力応答特性をつかむことができた。これにより、いくつかの検討課題は残されているものの、ALE有限要素法に基づく数値流体解析が、実際の橋梁断面の耐風設計上重要となる空力応答特性の問題に適用できることがわかった。

ところで、本論文で取り上げた様な箱桁断面橋梁は、一般に高欄等の添加物が付加されており、これらは耐風安定上無視できないものである。今後は、これらを考慮した解析を行う予定である。一方、数値解析条件の面でも検討すべき項目が残されている。実際の風洞実験は、2次元試験であってもスパン方向の流れが生じることから、流れの3次元性の影響も無視できない。よって、3次元解析を行う必要がある。また、レイノルズ数の問題は、文献¹⁴⁾でBruffな断面であっても静的空気力や振幅の大きさ等でレイノルズ数依存性が無視できない場合もあると指摘されているので、実際の風洞実験に近づけた値での解析を行う必要がある。ただし、ここでの数値解析条件に関し検討課題は、電子計算機の演算速度とコストに依存している問題なので、近い将来必ず解決されることと予想している。なお、本論文の計算は、DEC社製 α 300MHzプロセッサを搭載したパーソナルコンピュータ(POLYWELL 300W, WindowsNT仕様)を用いた。

謝 辞

本研究を行うに際し、三井造船(株)鉄構建設事業部技術部課長 井上浩男氏、同課長補佐 佐野健一氏、内藤誠氏に協力を頂いた。各位に感謝の意を表す。なお、本研究の一部は、文部省科学技術研究費・基盤研究(C)の給付を受けたことを付記す。

参考文献

- 1) 道路橋耐風設計便覧, (社) 日本道路協会, 1991
- 2) 土木学会構造工学委員会: 風工学における数値計算の応用と評価研究小委員会第2期活動成果報告書, 1996
- 3) 稲室隆二: 渦点法による剥離流れの数値シミュレーション, ながれ, Vol. 7, pp.104-122, 1988
- 4) 村上光功, 田中洋, 田原裕介, 姫野洋司: 渦放出パネル法による偏平体表面の圧力分布の推定, 構造工学論文集, Vol. 42A, pp.793-801, 1996
- 5) 平野廣和, 丸岡晃, 井上浩男: 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, pp.561-566, 1994
- 6) 渡邊茂, 平野廣和, 林健一, 池ノ内昌弘: 偏平箱桁橋の空力応答特性に関する数値流体解析, 第14回風工学シンポジウム論文集, pp.205-210, 1996
- 7) Kawahara, M., H. Hirano, and T. Kodama: Two-Step Explicit Finite Element Method for High Reynolds Number Flow Passed Through Oscillating Body, Finite Elements in Fluids Vol.5, pp.227-261, 1984
- 8) 野村卓史, 飯島正義: ALE法に基づく粘性流体と構造との相関問題の有限要素解析手法, 土木学会論文集, No.416/I-13, pp.285-294, 1990
- 9) Hirano, H., A. Maruoka and M. Kawahara: Finite Element Analysis of Fluid-Structure Interaction Problem and Its Application to Wind Resitance Design of Box Girder Bridge, Proc. of Int. Conf. on Finite Elements in Fluids, pp.235-pp.244, 1995
- 10) Nomura, T., M. Ohta, M. Shimura and A. Sekine: ALE Finite Element Flow Analysis of Vortex-Induced Vibration of a Circular Cylinder, Proc. of Int. Conf. on Finite Elements in Fluids, pp.623-pp.631, 1995
- 11) 井上浩男, 荒川孝, 池ノ内昌弘: 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, pp.251-256, 1982
- 12) Shimura M. and M. Kawahara: Two Dimensional Finite Element Flow Analysis using the Velocity Correction Method, Proc. of JSCE No.398 / I-10, pp.51-59, 1988
- 13) 太田真二, 丸岡晃, 平野廣和, 川原陸人: 亜臨界域における円柱まわりの3次元流れの数値流体解析, 第14回風工学シンポジウム論文集, pp.199-204, 1996
- 14) 土木学会構造工学委員会風洞相似則検討小委員会活動成果報告書, 1994
- 15) 田村哲郎, 伊藤嘉晃: 種々の辺長比を有する角柱周りの流れの3次元シミュレーション, 第13回風工学シンポジウム論文集, pp.537-542, 1994

(1996年9月6日受付)