LESと剛体振動連成計算による 一様風中橋梁振動の解析

杉山 裕樹¹・野田 博²・中山 昭彦³・佐藤 彰紀⁴・金治 英貞⁵

¹正会員 阪神高速道路株式会社 建設事業本部 (〒550-0011 大阪市西区阿波座1-3-15)

E-mail: hiroki-sugiyama@hanshin-exp.co.jp

²正会員 近畿大学教授 建築学部建築学科 (〒577-8502 東大阪市小若江3-4-1)

E-mail: hnoda@arch.kindai.ac.jp

³正会員 一般財団法人建設工学研究所 (〒657-0038 神戸市灘区深田町4-1-1)

E-mail: nakayama@kobe-u.ac.jp

⁴正会員 阪神高速道路株式会社 建設事業本部堺建設部 (〒590-0075 堺市堺区南花田口町2-3-20)

E-mail: akinori-sato@hanshin-exp.co.jp

⁵正会員 阪神高速道路株式会社 技術部 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町4-1-3)

E-mail: hidesada-kanaji@hanshin-exp.co.jp

計算機の性能の向上と数値解析法, 乱流シミュレーション法の発達により, 従来風洞実験あるいは現場観測などにより調べられていた橋梁の耐風特性が数値流体計算 (CFD) にて予測できる可能性が出てきている。そこで, 橋梁振動のうち, 桁の振動に着目し, 一般に使用可能な計算機環境で, 桁モデル周りの流れ場と剛体と仮定する桁の振動運動の連成計算を行い, 耐風設計への応用のための精度・信頼性を検証する。

本研究では, 筆者らが開発してきた直交格子を基にしたLarge-Eddy Simulation (LES)手法を橋梁の耐風安定性評価に応用し, バネとダンパーで支持された2自由度運動する物体に固定された非慣性系座標で定式化した差分法を用い, 一様風中の橋梁桁断面の空力特性予測に適用し, 風洞試験結果との比較によりその有用性を示す。

Key Words : *Flutter Analysis, Large-Eddy Simulation, Non-inertial coordinate*

1. はじめに

橋梁の設計, 特に長大橋の設計においては耐風安定性の検討が重要であり, その結果によって桁断面や塔形状が決定される場合も多い。そのため, 風洞試験等により安全性の検証や耐風安定性が確保される形状の検討などにより橋梁桁断面を再現した2次元剛体模型試験や橋梁全体系を模型化した橋梁全体系試験など膨大な数の風洞試験を実施する必要がある。一方, 近年では計算機の性能向上と数値解析法, 乱流シミュレーション法の発達により, 従来風洞実験あるいは現場観測などにより調べられていた橋梁の耐風特性が数値流体計算 (CFD) にて予測できる可能性が出てきている。橋梁は付加物の多い複雑な形状のスケールの大きい構造物でその動的耐風特性のすべてを精度よく数値モデルで予測することはいまだ難しいが, 橋梁振動のうち, 橋梁桁断面の静的あるいは2次元動的特性は汎用計算機にて得ることが可能である

といえる (例えば, 文献1))。つまり, 耐風安定性を確保した桁断面の形状を抽出するためにこれまで橋梁や架橋地点ごとに実施されてきた膨大なケース数の2次元剛体模型試験を数値計算により再現することが可能といえる。桁断面の振動に着目した場合, 静的空気力特性を把握し, 振動する桁断面の空力不安定特性を再現する必要がある。数値流体計算で振動物体を取り扱う方法としては, ALE法を用いて物体の移動に伴い相対速度分をLagrange的に取り扱う方法^{2,3,4)}, 空間と時間に関して逐次座標変換を行う一般座標を用いる方法⁵⁾, 座標を固定し移動する物体周りの境界条件をIB法で適宜設定する方法^{6,7)}, 移動物体を原点とした移動座標系すなわち非慣性系座標を用いる方法^{8,9,10)}, がある。橋梁桁断面の空力特性を検証する場合, 様々な桁断面に対して風速を変えて計算する必要があり, 膨大な計算時間を要する。従って, 計算機の発達した今日においても, より効率的で計算速度が速い手法が求められる。この観点においては, 物体

振動に伴い物体とともに座標が変化する非慣性系座標を用いる方法が、時間も含めた一般座標を用いる方法やALE法などのように計算格子を逐次再構築する必要がないため、最も有効な計算手法といえる。しかしながら、非慣性系座標を用いた計算は並進振動のみであったり^{8,9,10)}、計算領域外側の境界条件が不明確^{10,11)}、であったりする。

本研究では、著者ら^{10,12)}が開発してきた直交格子を基にしたLarge-Eddy Simulation (LES) 手法を並進移動ならびに回転移動する物体に固定された非慣性系座標とした基礎方程式を示し、剛体桁断面模型をバネとダンパーで支持される鉛直たわみおよび回転（ねじれ）の2自由度振動させる風洞試験の再現を試みる。なお、検証対象とした風洞試験は、橋梁全体系の構造特性をモーダル解析により3自由度（並進2方向とねじれ方向）1質点系に置換し、空力特性で重要となる桁断面形状を剛体模型で再現した、橋梁の空力不安定振動を検証する際に一般的に行われている¹³⁾、既往の2次元バネ支持模型試験^{14, 15)}である。一様流風中の風洞試験条件にて本論で示す数値解析法により計算し、試験結果との比較により本計算手法の有用性を示す。静的空気力係数、たわみおよびねじれの2自由度振動の比較検証、また、桁断面の形状の違いによる影響を検証対象とする。

2. 基礎方程式

(1) 非慣性系座標におけるLES方程式と連続の式

慣性系座標（静止座標） x_i と運動物体中心を原点とした非慣性系座標（移動回転座標） $\tilde{x}_i$ ならびにそれぞれの座標系での風速と境界条件の関係を図-1に示す。ここで、 $i=1\sim3$ で、 $i=1$ ：静止時の主流方向、 $i=2$ ：鉛直上方向、 $i=3$ ：奥行方向とする。本論文では、物体の運動は x_1, x_2 の2方向の並進運動と x_3 軸廻りの回転運動のみとする。ここで、 $\tilde{x}_i$ はその原点が静止座標系上の位置 $r_{oi}(t)$ に移動し、 x_3 軸廻りに $\theta(t)$ 回転（反時計方向を正）したものとすると、これら2つの座標系の関係は以下となる。

$$x_i = r_{oi}(t) + Q_{ij}(t)\tilde{x}_j \quad (1)$$

$$\tilde{x}_i = Q_{ji}(t)(x_i - r_{oi}(t)) \quad (2)$$

$$Q_{ij}(t) = \begin{bmatrix} \cos\theta(t) & -\sin\theta(t) & 0 \\ \sin\theta(t) & \cos\theta(t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

また、慣性系座標での速度ベクトル u_i と非慣性系座標での速度ベクトル $\tilde{u}_i$ の関係は以下となる。

$$u_i = Q_{ij}\tilde{u}_j + \frac{dr_{oi}}{dt} + \frac{dQ_{ij}}{dt}\tilde{x}_k \quad (4)$$

慣性系座標と非慣性系座標での流体の運動方程式は慣性項のみが異なり、粘性項と圧力項は変わらない。境界条件は、物体表面および物体から離れた遠方位置（計算領域境界）での風速ともそれぞれの座標から見た位置と相対風速で与えられることになる。LESでは空間フィルター平均を各物理量に施すが、瞬時々の空間フィルター平均は座標の運動には依存しない。従って、運動物体に固定された非慣性系座標 $\tilde{x}_i$ でのフィルター平均風速 $\tilde{u}_i$ とフィルター平均圧力 $\tilde{p}$ についての運動方程式と連続の式は下式となる。

$$\left(\frac{D\tilde{u}_i}{Dt} \right)_a = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{x}_i} + \nu \frac{\partial^2 \tilde{u}_i}{\partial \tilde{x}_j \partial \tilde{x}_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial \tilde{x}_j} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial \tilde{x}_i} = 0 \quad (6)$$

ここで、

$$\left(\frac{D\tilde{u}_i}{Dt} \right)_a = \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \tilde{u}_j \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial \tilde{x}_j} + \frac{d^2 r_{oi}}{dt^2} + 2\varepsilon_{ijk}\omega_j \tilde{u}_k + \varepsilon_{ijk}\varepsilon_{jlm}\omega_l \omega_m r_{ok} \quad (7)$$

である。 $(D/Dt)_a$ は非慣性系座標（移動回転座標）での実質微分、 ω は回転角速度ベクトルで成分は $(0,0,\omega)=(0,0,d\theta/dt)$ 、 τ_{ij} はサブグリッド応力成分、 ρ, ν はそれぞれ空気密度と動粘性係数である。 ε_{ijk} はレヴィ・チビタ記号（交換テンソル）である。

図-1 慣性系（静止）座標と非慣性系（移動回転）座標の関係

サブグリッド応力 τ_{ij} には、Nakayama&Noda¹²⁾で用いられたものと同様に、標準スマゴリンスキーモデル¹⁶⁾を用い、壁面近傍は、格子幅を小さくとり、粘着条件を用いる。

(2) 境界条件

一様な風中の桁断面の場合、慣性系座標（静止座標）での計算領域外側境界条件は、風上流入面（ $x_1=x_{in}$ ）で x_1 方向に一定風速 V_{in} 、桁断面の上方、下方の境界面（ $x_2=y_{up}$, y_{dn} ）も風上流入面と同じ一定風速 V_{in} 、風下流出面（ $x_1=x_{out}$ ）で自由流出である。すなわち、

風上流入面（ $x_1 = x_{in}$ ）では、

$$\bar{u}_1 = V_{in}, \bar{u}_2 = \bar{u}_3 = 0 \quad (8)$$

上方下方の境界面（ $x_2 = y_{up}$, $x_2 = y_{dn}$ ）では、

$$\bar{u}_1 = V_{in}, \bar{u}_2 = \bar{u}_3 = 0 \quad (9)$$

風下流出面（ $x_1 = x_{out}$ ）では、

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_1} = 0 \quad (10)$$

である。非慣性系座標では流入条件(8)式および上下端境界条件(9)式は

$$\tilde{u}_1 = V_{in} \cos \theta + \frac{d\theta}{dt} \tilde{x}_2 - \frac{dr_{o1}}{dt} \cos \theta - \frac{dr_{o2}}{dt} \sin \theta \quad (11)$$

$$\tilde{u}_2 = -V_{in} \sin \theta - \frac{d\theta}{dt} \tilde{x}_1 + \frac{dr_{o1}}{dt} \sin \theta - \frac{dr_{o2}}{dt} \cos \theta \quad (12)$$

$$\tilde{u}_3 = -\frac{dr_{o3}}{dt} \quad (13)$$

となる。

さらに風下流出面の自由流出条件(10)は

$$\frac{\partial \tilde{u}_1}{\partial \tilde{x}_1} = \frac{\partial \tilde{u}_1}{\partial \tilde{x}_2} \tan \theta - \frac{d\theta}{dt} \tan \theta \quad (14)$$

$$\frac{\partial \tilde{u}_2}{\partial \tilde{x}_1} = \frac{\partial \tilde{u}_2}{\partial \tilde{x}_2} \tan \theta - \frac{d\theta}{dt} \quad (15)$$

$$\frac{\partial \tilde{u}_3}{\partial \tilde{x}_1} = 0 \quad (16)$$

となる。

(11) 式～(16) 式に示す通り、慣性系座標上の一様な流入条件、自由流出条件は、非慣性系座標では回転角 θ を含む条件となる。

$\tilde{x}_3 (= \tilde{z} = z)$ 方向境界は、計算領域と同じ流れ場が繰り返しあるとし、周期境界条件、すなわち流速、圧力とも手前の面と奥の面で瞬時値が等しいとする。桁断面表面は滑面とし、境界条件は、桁断面に固定された非慣性系座標では流速は速度ゼロの粘着条件である。

(3) 物体の運動方程式

物体の運動方程式は、風洞試験で実施された桁断面のたわみおよびねじれ振動を対象とし、桁断面は剛体でバネとダンパーで支持されている。流れは3次元乱流で桁断面も3次元形状であるが、橋軸方向に同一形状が連続するうちの一部区間を計算対象としているため、計算対象断面に働く力と運動は桁断面を含む面内の平面的なものとする。時間 T での計算対象断面の風方向、鉛直方向の変位を $X(t)$, $Y(t)$ 、回転角を $\theta(t)$ とすると、これらについての運動方程式は、

$$m_{ij} \ddot{X}_i(t) + c_{ij} \dot{X}_i(t) + k_{ij} X_i(t) = f_i(t) \quad (17)$$

となる。ここで、

$$X_i(t) = \begin{Bmatrix} X_1(t) \\ X_2(t) \\ \theta(t) \end{Bmatrix} \quad (18)$$

$$\dot{X}_i(t) = \begin{Bmatrix} \frac{dX_1(t)}{dt} \\ \frac{dX_2(t)}{dt} \\ \frac{d\theta(t)}{dt} \end{Bmatrix} \quad (19)$$

$$\ddot{X}_i(t) = \begin{Bmatrix} \frac{d^2 X_1(t)}{dt^2} \\ \frac{d^2 X_2(t)}{dt^2} \\ \frac{d^2 \theta(t)}{dt^2} \end{Bmatrix} \quad (20)$$

$$f_i(t) = \begin{Bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_\theta(t) \end{Bmatrix} \quad (21)$$

$$m_{ij} = \begin{bmatrix} m & 0 & -s_2 m \\ 0 & m & s_1 m \\ -s_2 m & s_1 m & I \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$c_{ij} = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & 0 \\ 0 & c_2 & 0 \\ 0 & 0 & c_\theta \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$k_{ij} = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & -\varepsilon_2 k_1 \\ 0 & k_2 & \varepsilon_1 k_2 \\ -\varepsilon_2 k_1 & \varepsilon_1 k_2 & k_\theta \end{bmatrix} \quad (24)$$

ここで、 $X_1(t), X_2(t), \theta(t)$ はそれぞれ x_1 方向、 x_2 方向の物体変位と x_3 軸廻りの回転角、 $f_1(t), f_2(t), f_\theta(t)$ はそれぞれ x_1 方向、 x_2 方向の風力と x_3 軸廻りの振れモーメント(ピッチングモーメント)、 m, I はそれぞれ物体質量と原点廻りの慣性モーメント、 c_1, c_2, c_θ はそれぞれ x_1 方向、 x_2 方向、 x_3 軸廻りの減衰係数で各方向の速度(角速度)にのみ依存すると仮定、 k_1, k_2, k_θ はそれぞれ x_1 方向、 x_2 方向、 x_3 軸廻りの剛性、 s_1, s_2 は原点と重心の距離、 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ は原点と剛心の距離、である。

x_1 方向、 x_2 方向の風力ならびに x_3 軸廻りの振れモーメント(ピッチングモーメント)は下式により算出した。

$$f_i(t) = \sum_{j=1}^N (e_i \cdot n_j)(p_j(t) - p_0) a_j \quad (25)$$

$$f_\theta(t) = \sum_{j=1}^N (L_j \cdot n_j)(p_j(t) - p_0) a_j \quad (26)$$

ここで、 $f_i(t)$: i 方向風力($i=1$: x 方向、 $i=2$: y 方向)、 e_i : i 方向単位ベクトル、 n_j : 構造物表面の j 点における表面に対する法線方向単位ベクトル、 $p_j(t)$: j 点の圧力、 a_j : j 点の負担面積(計算セルの構造物表面側の面積)、 p_0 : 基準圧力(流入境界圧力)、 L_j : 構造物中心(ねじれ中心で図-2(a)、図-3(a)に示す)から j 点の位置ベクトル、

●: 内積を表す。

3. 計算手法ならびに計算条件

(1) 計算手法

流れの数値計算法は食違い直交格子上でHSMAC法に準じた方法で、まず運動方程式(5)を陽的に差分し、時間進行させ流速の予測値を求める。次にその速度成分が連続の式(6)を満たすように、圧力と速度成分を反復修正していく方法である。計算格子は不等間隔直交格子である。空間差分は2次精度中心差分、ただし、移流項には3次精度風上差分、時間積分は3次精度Adams-Bashforth法を用いている。

運動方程式(17)は、Newmark- β 法で差分化して解く。なお、 β の値は1/6(線形加速度法)とした。

(2) 計算条件

計算対象とする桁断面は、他機関で実施された桁断面の風洞試験で用いられた模型¹⁹⁾を参考とし、図-2に示す π 型ガーダを基本断面とした。寸法は、基本断面幅員 $B=347.5\text{mm}$ 、桁高さ $H=34\text{mm}$ であり、図の左半分は床板とI桁を、右半分は横桁のある断面を示す。横桁は、橋軸方向に192mmピッチで設置されているので、数値解析には横桁を中心にスパン $l=192\text{mm}$ の部分を対象とする。図中になが、道路面には左右端および中央に高欄が設置されており、高さ12.5mmの位置のレールと間隔27mmで7本の柱からなる。また、桁配置の違いによる空力特

(a) 桁断面寸法

(b) 計算格子で表現した桁表面

図-2 計算対象桁断面形状(π 型ガーダ)

(a) 桁断面寸法

(b) 計算格子で表現した桁表面

図-3 計算対象桁断面形状(エッジガーダ)

(a) 計算格子で表現した桁表面

図-4 計算対象桁断面形状（ π 型ガーダ水平板付）

表-1 桁断面の構造諸元

項 目	実橋	風洞試験
桁高	2.5 m	0.031 m
桁幅	27.8 m	0.348 m
単位長さあたり等価質量	17.4 t/m	2.72 kg/m
単位長さあたり等価慣性モーメント	1561 tm^2	0.0381 kgm^2
鉛直たわみ固有振動数	0.282 Hz	2.66 Hz
ねじれ固有振動数	0.667 Hz	6.135 Hz
鉛直たわみ対数減衰率	0.02	0.02
ねじれ対数減衰率	0.02	0.02
鉛直たわみスクルートン数	92	92
ねじれスクルートン数	1321	1321

図-5 計算領域

性の影響を検証するため、主桁を左右両端に配置した図-3に示すエッジガーダも計算対象としている。さらに、図-4に示すような π 型ガーダに耐風安定性向上対策として高欄線外側に設けた道路面と平行な13mmの水平板を設けた桁断面も計算対象とした。文献14)に示される風洞試験は、桁断面を対象にバネ支持された2次元剛体風洞試験であり、実橋の1/80縮小模型である。桁断面の実橋および風洞試験における構造諸元¹⁵⁾は表-1に示す。なお、本計算においても桁断面は、風洞試験と同様に剛体としている。(20)式中の質量、慣性モーメント、各方向の剛性、減衰係数はいずれも風洞試験¹⁵⁾と等しくした。

計算領域を図-5に示す。格子数は、 x 、 y 、 z 方向に213 $\times$ 135 $\times$ 49である。最小格子幅は桁断面近傍で同方向に3mm、1.5mm、4mm、桁断面から離れるにつれて徐々に間隔が広がる不等間隔である。

風向は、迎角0度とした。桁断面は、直交格子の節点のうち、対象形状内の節点の変数値をゼロに強制した。

図-6 π 型ガーダの静的空気力係数（10m/s）

表-2 静的空気力係数の風洞試験との比較¹⁴⁾

項 目	計算	風洞試験
抗力係数 C_D	1.555	1.804
揚力係数 C_L	-0.545	-0.211
ピッチングモーメント係数 C_M	0.054	0.066

4. 計算結果の検証

(1) 静的空気力係数の比較

桁断面にかかる抗力 D 、揚力 L および桁中央床板上面の点を中心とする回転モーメント M の検証を行う。対象とする桁は風洞試験結果のある π 型ガーダである。流れ計算における各係数の算出にあたっては、桁断面は固定とし、(28)式、(29)式を用いて算出した。図-6に本解析で得られた流入風速10m/sにおける抗力係数 C_D 、揚力係数 C_L 、およびピッチングモーメント係数 C_M のそれぞれの経時変化を示す。併せて、風洞試験にて計測されたそれぞれの平均値¹⁴⁾と計算結果における定常状態と考えられる0.25秒間の平均値との比較を表-2に示す。抗力係数およびピッチングモーメント係数は風洞試験結果とほぼ同程度の値を示しているが、揚力係数は、やや小さい値と計算されている。本計算で対象とする橋桁断面モデルの迎角ゼロの風に対する揚力の値はもともと小さい。揚力の計算値は実験値に比べ負に大きい値になっているが、その差は抗力に比べ小さく、桁にかかる力の算定には大きな問題でないと考えられる。

(2) π 型ガーダの2自由度振動特性

π 型ガーダの $V_{ir}=10\text{m/s}$ と $V_{ir}=12\text{m/s}$ におけるたわみ振幅およびねじれ角の時系列を図-7に示す。前項で示した揚力係数に従い、風速10m/sでは計算初期段階にたわみが1.3cm程度下がった位置で限定振動が発生している。たわみ振幅で0.4cm程度、ねじれ角振幅で0.3度程度である。一方、風速12m/sでは、ねじれ角が時系列とともに拡大しており、発散振動が発生しているといえる。

(a) 風速10m/s

(b) 風速12m/s

図-7 たわみ量およびねじれ角の時系列 (π型ガーダ)

(a) 風速10m/s

(b) 風速12m/s

図-9 たわみ量およびねじれ角の時系列

(a) 風速2.5m/s

(b) 風速3.0m/s

図-8 たわみ量およびねじれ角の時系列

(3) エッジガーダの2自由度振動特性の比較

エッジガーダにおける低風速域 $V_{ir}=2.5\text{m/s}$, 3.0m/s におけるたわみ振幅およびねじれ角の時系列を図-8に示す。

$V_{ir}=2.5\text{m/s}$ で周期3Hzほどの全振幅0.3cm程度のたわみおよび 0.2° 程度のねじれ振動が見られる。さらに風速を上げ $V_{ir}=3.0\text{m/s}$ では振幅がこれよりやや下がっている。この振動幅の増加は、渦励振による可能性はあるが、ストローハル数など詳細の検討が必要である。

次に高風速域である $V_{ir}=10\text{m/s}$ および 12m/s におけるたわみ振幅およびねじれ角の時系列を図-9に示す。風速10m/sにおいてねじれ角振幅が次第に大きくなる様子が再現されており発散振動といえる。さらに、風速12m/sではねじれ角振幅が風速10m/sのそれよりさらに大きく発散振動といえる。

(4) 桁形状変更による影響

桁断面について、π型ガーダとエッジガーダとを比較する。本解析で得られたエッジガーダにおける静止桁の抵抗係数 C_D 、揚力係数 C_L 、回転モーメント係数 C_M を図-10に、定常状態と考えられる0.25秒間の平均値におけるπガーダとの比較を表-3に示す。図-6のπ型ガーダと比較すると、エッジガーダではπ型ガーダに比べ抵抗係数 C_D が大きく、揚力係数 C_L および回転モーメント係数 C_M が小さい傾向にある。

次に流入風速 $V_{ir}=10\text{m/s}$ におけるたわみ量およびねじれ角の時系列を比較する。π型ガーダは図-7(a)で、エッジガーダが図-9(a)である。エッジガーダでは回転角が時間とともに大きくなり発散していく様子がうかがえる。一方、π型ガーダは限定的な振動にとどまっている。

図-10 エッジガーダの静的空気力係数 (10m/s)

表-3 静的空気力係数の比較

項 目	エッジガーダ	π ガーダ
抗力係数 C_D	2.615	1.555
揚力係数 C_L	-0.184	-0.545
ピッチングモーメント係数 C_M	-0.010	0.054

(a) 風速 10m/s

(b) 風速 12m/s

図-11 たわみ量およびねじれ角の時系列
(π 型ガーダ水平板付)

(5) 付加物の有無による影響の比較

π 型ガーダにおける高欄線外側に設けた水平板の影響の有無を比較する。水平板を設けた場合の流入風速 $V_{in}=10\text{m/s}$ および 12m/s におけるたわみ量およびねじれ角の時系列を図-11に示す。水平板がない場合は、図-7である。水平板がない場合は、流入風速 10m/s で、たわみ、

図-12 実橋換算での風洞試験結果との比較

ねじれとも、振動し始めは下向きの揚力を受けるため下方に移動するとき振動があるものの、計算開始1秒後にはたわみ振幅 0.5cm 以内、ねじれ振幅は 0.5° 以内に落ち着く。これに対し、風速 12m/s では、たわみ、ねじれとも振幅が増加し、計算開始1秒後にはそれぞれ 1cm 、 3° に増加している。この後も増加し、不安定になる。これに対し、水平板がある場合は風速 10m/s では、計算開始1秒後にはたわみ振幅 0.2cm 、ねじれ振幅 0.8° 程度に落ち着いている。また、風速 12m/s でも計算開始1秒後にはたわみ振幅は 0.5cm 、ねじれ振幅は 2° 程度で、徐々に拡大し発散していく傾向がうかがえるが、水平板がない場合と比べ、振幅が低減しているのがわかる。

(6) 風洞試験結果との比較

本計算の妥当性を検証するため風洞試験結果との比較を行う。なお、文献(14)にはねじれ倍振幅と実橋換算風速との関係が示されているため、ここでは、実橋換算によるねじれ倍振幅での比較を行う。図-12に実橋換算風速とねじれ倍振幅との比較を示す。風洞試験結果では、実橋換算風速 60m/s 程度を超えるとエッジガーダは発散振動し、 π 型ガーダでは実橋換算風速 95m/s 程度を超えると発散振動している。 π ガーダ水平板付では実橋換算風速 100m/s を超えても発散振動していない。一方、計算結果では、実橋換算風速 85m/s (風洞試験風速 10m/s) ではエッジガーダは発散振動し、 π ガーダは限定振動となっている。限定振動の振幅は風洞試験結果に比べ大きいのが桁形状の違いによって発散振動となるか限定振動となるかは再現できているものと考えられる。一方、実橋換算風速 104m/s (風洞試験風速 12m/s) では π ガーダにおいて風洞試験、計算ともに発散振動となっているが、 π ガーダ水平板付では、風洞試験では限定振動、計算では発散振動となり異なる結果となった。水平板は小さな部材であるため、本解析の解像度の問題により異なる結果になったものと考えられる。しかしながら、前述(4)で述べたとおり、計算において水平板付がある方が振幅は小

さくなる傾向にあるため、ある程度の空力的な効果がみられるものの今後の課題である。たわみ振動に関しては、本解析で実施した実橋換算風速102m/s（風洞試験風速12m/s）以内では発散振動が発生しておらず、風洞試験¹⁴⁾でも発散振動が発生していない。

5. まとめ

本稿では、物体に固定した非慣性系座標でのLESの基礎方程式を示すとともに、本計算手法により橋梁桁断面を再現した2次元剛体バネ支持模型風洞試験を対象に一樣流中の2自由度振動の計算を行った。その結果、静的空気力特性や発散振動の発生の有無、桁断面形状の違いによる空気力特性の違いについて、風洞試験で確認された振動現象が再現可能であることが確認された。

参考文献

- 1) 東隆介, 平野廣和: 1:13 矩形断面に作用する非定常空気力の数値流体解析による検討, 第 18 回風工学シンポジウム, pp. 287-292, 2004.
- 2) Hirt, C.W., Amsden, A.A., and Cook, J.L.: An Arbitrary Lagrangian-Eulerian Computing Method for All Flow Speeds, *J. Computational Physics*, 14, pp. 227-253, 1974.
- 3) 野村卓史, 飯島政義: ALE 法に基づく粘性流体と構造の相関問題の有限要素解析手法, 土木学会論文集, 第 416 号 I-13, pp. 285-294, 1990.
- 4) 嶋田健司, 石原孟: 構造基本断面の空力不安定振動応答評価に関する二次元非定常 k-e モデルの適用性の検討, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.3, pp. 554-567, 2009.
- 5) 田村哲郎, 伊藤嘉晃: 振動する角柱周りの流れと風圧力に関する 3 次元解析の予測精度, 日本建築学会構造系論文集, 第 492 号, pp. 29-36, 1997.
- 6) Mittal, R. and Iaccario, G.: Immersed Boundary Methods, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol.37, pp.239-261, 2005.
- 7) Sudhakar, T., Vengadesan, S.: Flight force production by flapping insect wings in inclined stroke plane kinematics, *Computers & Fluids*, Vol.39, pp.683-695, 2010.
- 8) 加藤真志: 流れ直角方向に振動する角柱の 2 次元流れ解析による空力評価, 日本風工学会誌, 第 70 号, pp. 15-26, 1997.
- 9) 坂本成弘, 持田灯, 村上周三: 振動する 2 次元角柱に作用する変動風圧力に関する LES と実験の比較, 日本建築学会構造系論文集, 第 470 号, pp. 35-42, 1995.
- 10) 中山昭彦, 永井史保, 野田博: LES による角柱の振動応答解析, 土木学会応用力学論文集, Vol.1, pp.633-640, 1998.
- 11) 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, 土木学会応用力学論文集, Vol.3, pp. 707-712, 2000.
- 12) Nakayama, A. and Noda, H.: LES simulation of flow around a bluff body fitted with a splitter plate, *J. Wind Eng. and Ind. Aerodyn.*, Vol. 85, pp. 85-96, 2000.
- 13) 社団法人日本道路協会: 道路橋耐風設計便覧 (平成 19 年改訂版), 2007.
- 14) 西野直均, 森谷信也, 古家和彦, 二宮仁司: 鋼床版 I 桁を有する斜張橋の耐風安定性について, 土木学会第 61 回年次学術講演会概要集, I -069, pp.137-138, 2006.
- 15) 西野直均, 森谷信也, 淵田政信, 古家和彦, 二宮仁司: 斜張橋のコスト縮減について, 土木学会第 61 回年次学術講演会概要集, I -148, pp.295-296, 2006.
- 16) Smagorinsky, J.: General circulation experiments with the primitive equations. I. The basic experiment, *Mon. Weather Rev.*, Vol.91, pp.99-164, 1963.

(2014.6.20 受付)

Flutter Analysis of a Bridge Deck in a Uniform Wind by a LES and Rigid-Body Motion Interaction Calculation

Hiroki SUGIYAMA, Hiroshi NODA, Akihiko NAKAYAMA, Akinori SATO and Hidesada KANAJI

As a step toward obtaining aeroelastic characteristics of suspension bridges by numerical simulations instead of costly wind-tunnel or on-site tests, fluid-structure interaction analysis of a girder bridge section in a uniform wind has been conducted and its accuracy and reliability as a design tool for wind stability of bridges have been examined. The two-degree motion of rigid-body girder sections undergoing heaving and torsional vibrations has been simulated by a Large-eddy Simulation (LES) method. The LES methods which is based on the non-inertial coordinates fixed on moving body, had been validated in analyzing aerodynamic forces and lateral vibration of a square cylinder. Comparing with corresponding wind-tunnel test results, it has been found that the differences in vibration characteristics due to different oncoming wind speeds, different section geometries and the effects of various appendices are reproduced well. Some discrepancies of the simulated results from the experiments are found but they are mostly due to the inadequacy of computational grid resolution, which can be improved by using finer grids and more powerful computing system.