ー様流中におかれた二次元形状を有する振動柱と周辺気流の 相互作用に関する研究

-New Hybrid振動法を用いた風洞実験-

〇日大生産工(学部) 磯野 由佳 日大生産工(HRC) 岡田 玲 Wind Style 松山 哲雄 日大生産工 神田 亮 日大生産工 丸田榮藏

1. はじめに

一般にハイブリッド実験テクニックとは、異なるシミュレーションテクニックの組み合わせにから成り立つ技術である。実験と数値解析を組み合わせたもの^[1]や、異なる数値解析手法を組み合わせたもの^[2]など様々な現象の分析のために開発されてきた。この技術を風洞実験と数値解析の組み合わせに適用したものがHybrid振動法であり^[3]、振動時の表面圧力も測定できるのがNew Hybrid振動法である。

従来の風洞実験において構造物の風応答をシ ミュレーションする方法には自由振動法と強制 振動法[4]のふたつが挙げられる。自由振動法とは 構造物の動的特性をおもり、ばね、粘性ダンパー 等で模擬した実験モデルを風洞気流中で自由振 動させて応答を直接測定する方法で、構造物と気 流との相互作用は再現できるものの非定常空気 力を直接測定することはできない。一方強制振動 法では風洞気流中で模型を強制的に調和振動さ せることにより非定常空気力の振幅や位相の情 報を調べることが可能である。しかしながらこの 方法では外力のフィードバックが無く、構造物と 周辺気流の相互作用は再現されていない。また静 止模型により構造物に作用する風力や風圧を測 定する手法もあるが、静止角柱が対象となるため 構造物と気流の相互作用により生じる複雑な現 象を把握することは困難である。

それに対してNew Hybrid振動法は、従来の実験 方法では明らかにできなかった振動時のモデル 表面に働く圧力を測定することが可能であり、そ こから力の算定も可能である。したがって非定常 空気力を測定することもできる。

本研究ではNew Hybrid技術を用いて、高い速度 の風にさらされた高層建築物に生じうる空力不 安定現象の発生機構を明らかにすることを目的 とする。具体的には一様流中に置かれた二次元物 体を対象とした実験システムを構築し、振動時の 圧力分布、風力の性状などを把握することを目的 としている。

2. New Hybrid 振動法

New Hybrid振動法では、模型の振動方程式中の 質量、減衰、剛性はコンピュータ内で設定される。 また方程式中の外力項には、風洞実験から得られ る、気流と構造物の相互作用により生じる風外力 が代入される。この振動方程式によりコンピュー タ内で応答値が計算され、その変位になるような 速度で模型を加振する。これを高速に繰り返すこ とで気流と構造物の相互作用を含む振動を模型



Fig.1 Concept of New Hybrid Vibration Technique

New Hybrid振動システムは、模型を強制的に加 振する加振機構、風外力を測定する風圧測定機構 およびstep by stepの応答計算を行うコンピュー タで構成されている。外力測定機構で測定された 風圧および応答変位はA/Dコンバータを介してコ ンピュータに転送される。応答計算により求めら れた変位となるような速度に基づいて模型が加 振される。同時に模型の変位は変位センサーによ って測定され、目標変位と比較される。両者に誤 差がある場合は、補正計算^[5]によりその差を無く すような加振が行われる。

2. 1 模型加振機構

実験模型はサーボモータにより目標変位まで 加振される。二次元Hybrid振動装置の自由度はX方向(風方向)、Z方向(風直角鉛直方向)、 θ 方向(回転方向)の3自由度であり、これらは独 立に制御される。振動時の模型の可動範囲はX、 Z軸方向で±約105mm、 θ 軸については±10degで ある。

2.2 外力測定機構

New Hybrid振動法では、風圧センサーにより測 定された模型壁面に作用する風圧から風外力を 計算する。

風圧から風外力を計算する過程の模式図を Fig. 2に示す。

図中においてP:測定点の風圧、A:測定点1 点あたりの負担面積、L:模型中心までの距離、 θ :回転角度である。模型に作用する外力は、水 平力 F_{t} が $PA\cos\theta$ 、鉛直力 F_{t} が $PA\sin\theta$ 、左右面 に作用する回転モーメント M_{θ} の水平方向が

Interactions between 2D-Oscillating Cylinder and Uniform-Air Flow -Wind Tunnel Test using New Hybrid Vibration Technique-

○Yuka ISONO, Rei OKADA, Tetsuo MATSUYAMA, Makoto KANDA and Eizo MARUTA



 $PA\cos\theta \times L\sin\theta$ 、鉛直方向が $PA\cos\theta \times L\cos\theta$ となる。また、上下面の場合は θ に90度を加えて 左右面と同様の計算を行う。各圧力センサーで測 定された水平力、鉛直力、回転モーメントはそれ ぞれ積分して模型に作用する風外力として用い られる。

2.3 数値計算アルゴリズム

New Hybrid振動法は、1 stepごとに実験により 測定された外力を用いて応答計算を行うリアル タイムシミュレーションである。また、1 step内 に加振機構により応答値を模型に与える過程も 含まれている。このため、用いられる数値積分法 には以下のような制約がある。

陽的である。

③ 数値的な安定性、制度に優れている。

これらの条件を満たすものとして、α-OS法^[6]を 採用する。

$$\begin{aligned} M\ddot{X}_{n+1} + (1+\alpha)C\dot{X}_{n+1} - \alpha C\dot{X}_{n} \\ + (1+\alpha)(K^{T}X_{n+1} + K_{n+1}^{E}\widetilde{X}_{n+1}) \\ - \alpha(K^{T}X_{n} + K_{n}^{E}\widetilde{X}_{n}) \\ = (1+\alpha)F_{n+1} - \alpha F_{n} \end{aligned}$$
(1)

$$\widetilde{X}_{n+1} = X_n + \Delta t \dot{X}_n + \Delta t^2 \left(\frac{1}{2} - \beta\right) \ddot{X}_n$$
(2)

$$X_{n+1} = \tilde{X}_{n+1} + \Delta t^2 \beta \ddot{X}_{n+1} \tag{3}$$

$$\dot{X}_{n+1} = \dot{X}_n + \Delta t \{ (1 - \gamma) \ddot{X}_n + \gamma \ddot{X}_{n+1} \}$$
(4)

$$\beta = \frac{(1-\alpha)^2}{4}, \quad \gamma = \frac{1}{2} - \alpha$$
 (5)

ここでM:質量、C:減衰係数、F:風外力、 Δt :時間刻み、 $X_n \cdot \dot{X}_n \cdot \ddot{X}_n$:nステップにおけ る変位・速度・加速度、 $X_{n+1} \cdot \dot{X}_{n+1} \cdot \ddot{X}_{n+1}$:n+1 ステップにおける変位・速度・加速度、K':線 形剛性、 $K_n^{\varepsilon} \cdot K_{n+1}^{\varepsilon}$:n、n+1ステップの非線形剛 性、 $\tilde{X}_n \cdot \tilde{X}_{n+1}$:n・n+1ステップの予測子変位、 $\alpha \cdot \beta \cdot \gamma$:数値減衰パラメータである。

3. 実験概要

3.1 風洞概要

本実験は日本大学生産工学部所有の回流式開 放型風洞装置(ゲッチンゲン型風洞)で行った。 3.2 実験模型

実験模型は、150mm×150mm×750mmの正方形

断面を有する角柱である。実験模型の平面図を Fig. 3.1に示す。風圧センサーは各辺につき8点ず つ1層32点が2層で、合計64点設けられている。測 定孔の位置をFig. 3.2に示す。

本実験で用いる風洞実験装置は一様流中に装置の一部が風洞気流にさらされる。風洞気流内に装置が露出しているためセンサー付近の一様流が乱されないために装置は整流用端板に囲まれている。測定部の概観をFig.4に示す。



Fig.4 Overview of 2D Flow Field

実験に先立って、実験モデル周辺に一様流が確 保されているかの確認のために気流測定実験を 行った。Fig.5に気流測定を行ったラインを示す。

測定項目は基準位置で基準化した平均風速 ($U_n = \overline{U} / \overline{U}_{ref}$ 、 \overline{U} ;平均風速、 \overline{U}_{ref} ;基準平均 風速)および乱れ強さ($I = U_{mns} / \overline{U}$ 、 U_{mns} ;標準 偏差、 U_{mns} ;平均値)である。測定ラインを下記 に示す。 ①模型軸での風直角方向水平方向気流分布 ②模型位置での鉛直方向気流分布

(端板間中心およびセンサー位置) ③端板間中心での風方向水平分布

①では設計した整流用端板付近に生じる境界層 厚さを測定すること、②では同じく設計した床端 板付近に生じる境界層厚さを、③では実験モデル 付近において流れ方向に均一な気流性状が確保 されているかを確認し、総合的に実験もモデル周 辺に均一で乱れの少ない一様流流れ場が確保さ れているかの検証を行う。Fig.6に気流測定結果 を示す。



Fig.5 Measuring lines for Air Properties





以上の気流測定結果から整流用端板および床 端板の境界層厚さはそれぞれ70mm、100mmであり、 それ以外の領域では乱れ強さ0.5%以下の一様流 が確保されていることがわかった

4. 静止角柱表面の風圧性状

本実験では、測定機構によりとらえられた外力 の妥当性を検証するため静止時の風圧実験を行 う。既往の研究との対応により、振動実験時の外 力項としてふさわしい精度が得られているかの 検証を行う。

4. 1平均風圧性状

Fig.7に本実験システムを用いて測定された角柱 表面の平均風圧性状を既往の研究[7],[8],[9]との対 応で示す。既往の研究はレイノルズ数 (*Re*=U·L/v、U:代表風速L:代表長さv:同粘 性係数)に幅があるが、正方形は完全剥離断面で あるため風圧性状のレイノルズ数依存性が認め られにくい断面である。図中では模型付近の総圧 の平均値と静圧の平均値の差を代表地点の速度 圧の平均値で除した平均風圧力係数(C_p)で表 している。本研究・既往の研究ともに風上面中央 で最大値1.0をとり、側面および背面では負の値 をとる。また分布形状を見るとほぼ左右対称にな っている。平均風圧分布の正面は本研究を含めて ほぼ重なっているが、側面・背面では近い値は示 すもののバラつきが見られる。これは一様流とい っても乱れ強さが実験により異なり渦の発生形 態の違いから生まれてくるものと考える。

4. 2 変動風圧性状

次にFig.8に角柱表面の変動風圧性状を既往の 研究との対応で示す。変動風圧係数は総圧と差圧 の差の標準偏差を速度圧の平均値で除した変動 風圧係数(*C*)で表している。本研究・既往の 研究^{[8],[9],[10],[11],[12]}ともに正面で最小値をとって いる。変動風圧分布も正面はどの実験結果も合っ ているが、側面・背面は合っているとは言えない。 これはレイノルズ数60000以下の領域では*Cp*' に レイノルズ数依存性があること^[8]、各実験で気流 に含まれる乱れ強さが異なり角柱周辺の流れ場 が異なってくることなどが原因になっていると 思われる。しかし定性的には同じ傾向を示してい る。





Fig.8 Fluctuate Pressure Coefficients

5. まとめ

本報告では構築した一様流におかれた2次元 正方形角柱と気流の相互作用をシミュレートす るシステムの概要を示し、基本的な条件下での定 量的な評価をこころみた。得られた知見を以下に 示す。

・Hybrid装置を風洞内に置いたときに模型周辺の 充分な領域に一様な流れ場を確保するための整 流端板を作成しその気流性状を把握した結果、乱 れ強さ0.5%以下の一様流が確保されていること がわかった。

・既往の研究により性状が明らかにされている平 均および変動風圧力係数の分布を求めた結果既 往の研究ときわめてよい対応を示していること がわかった。

6. 展望

今後も様々な側面からの本システムによる実 験結果の精度検証をすすめていく。それとともに 本実験システムの特長である振動角柱の表面圧 力分布の測定が可能であること、実験モデルに非 線形復元力特性を組み込めることなどを生かし て今後下記の対象に対して検証・現象解明を進め る予定である。

- ・多自由度正方形角柱に対する検討
- ・異なる断面形状(ex.長方形)に対する検討
- ・弾塑性復元力を有する構造物に対する検討

参考文献

- 1. D. Rittel, A hybrid experimental-numerical investigation of dynamic shear fracture, Engineering Fracture Mechanics, (2004)
- 2. Patricia Melin and Oscar Castillo, Adaptive intelligent control of aircraft systems with a hybrid approach combining neural networks, fuzzy logic and fractal theory, Applied Soft Computing, V3, I4, 353-362, (2003)
- M. Kanda, A. Kawaguchi, T. Koizumi, and E. Maruta, A new approach for simulating aerodynamic vibrations of structures in a wind tunnel –development of an experimental system by means of hybrid vibration technique, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 91, 1419-1440, (2003)
- R. E. D. Bishop and A. Y. Hassan, The lift and drag forces on a circular cylinder oscillating in a flowing fluid, Proc. R. Soc. London, Ser. A, 227, 51-75 (1964)
- 5. 名波 航、平田 和也、松山 哲雄、神田 亮、 丸田 栄蔵、New Hybrid 振動法による高層建 物の非定常空力振動シミュレーションに関 する研究、日本大学生産工学部学術講演会 後援概要集、37、(2004)
- 6. 中島正愛、赤澤隆士、坂口理、実験誤差制御機能を有したサブストラクチャ仮動的実験のための数値積分法、日本建築学会構造系論文報告集、454、61-71、(1993)
- 7. 西村宏昭、Bluff Body の空力特性に関する基礎的研究、京都大学学位論文 (2001)
- Bearman, P. W. and E. D. Obasaju: An experimental study of pressure fluctuations on fixed and oscillating square-section cylinders, Journal of Fluid Mechanics, 25, 401-413 (1982)
- 9. B. E. Lee, The effect of turbulence on the surface pressure field of a square prism, Journal of Fluid Mechanics, 69, 263-282, (1975)
- Vickerly, B. J., Fluctuating lift and drag on a long cylinder of square cross-section in a smooth and in a turbulent stream, Journal of Fluid and Mechanics, 25, 481-494, (1966)
- 11. Pocha J. J., On unsteady flow past cylinders of square cross-section. Ph. D. thesis Department of Aeronautics, Queen Mary College, London
- Wilkinson, R. H. 1974 On the vortex-induced loading on long bluff cylinders. Ph. D. thesis, Faculty of Engineering, University of Bristol, England