# ー様流中におけるブラッフボディの空力振動特性に関する研究

### -その1 ハイブリット振動実験法について-

日大生産工(院)	名波	航	日大生産工(院)	永塚康宏
日大生産工	〇神田	亮	日大生産工	丸田榮蔵

# 1. 序論

ブラッフボディは,流れに対し流線形では ない断面を有する構造物で,空気流体の影響 を受けるにも関わらず、その用途から、流体 中の挙動の安定性を優先して設計できない構 造物に見られる。その代表的なものが、つり 橋や超高層ビルである。構造物の安全性を確 保するには、現象のメカニズム・挙動を解明 することが重要であり、それに対する研究<sup>1)</sup> ~13)は、古くから数多く行われ成果を挙げて いる。近年 CFD(Computational Fluid Dynamics) などの数値シミュレーションによる研究<sup>14)</sup> も盛んに行われるようになったが、この種の 研究は、今なお風洞実験装置を用いた実験的 研究が主流である。著者らは、ハイブリット 式実験の考え方を構造物の空力振動実験に応 用した,ハイブリット空力振動実験法を提案 し,いくつかの研究成果<sup>15~17)</sup>を挙げてきた。 また、さらにその考え方を発展させた、ニュ ーハイブリット空力振動実験法(New Hybrid Aerodynamic vibration Technique 以下: NHAT) を提案した。NHAT は、従来の空力振動実験 法にはない利点を有しており、この分野に新 たな知見を見出す可能性を有している。本論 文では、NHAT の原理・特長を紹介し、それ を活かした実験を実施し、新しい知見を見出 す可能性を探ることを目的とする。

# 2. ハイブリット振動法

NHAT は、コンピュータ内で Step-by-Step の数値積分を行いながら、構造物の応答値を 求める。ただし、各ステップで次ステップを 求めるために必要な空気外力は、実験模型上 において圧力センサーにより測定される。外 力を適切に評価するためシステムの動作には、 リアルタイム性が必要でありまた、模型の挙 動には、応答値がリアルタイムで再現されな ければならない(図1)。このようなシミュレ ーションを行うと他の空力振動実験や数値シ ミュレーションにはない特長を有する。 それらを以下に示す。

1. 不安定振動時であっても外力と応答を同時 に計測することが可能であるため、各々の変 動のみならず正しい相関をもって算定するこ とが可能である。

2.1に関する特長が模型に作用する風力レベルだけでなく局所的な風圧分布に関しても同様である。

3. 質量,減衰,固有振動数などの振動パラメ ータ設定の容易さ,正確さがあるため実験精 度が向上するとともに実験効率が向上する。 更に他の空力振動実験法では再現が困難なパ ラメータでのシミュレーションも可能である。 4. 風洞気流中においても,数値モデルの導入 によって例えば制振部材,免振部材を設置し た構造物の風応答の再現を可能とする。

### 3. 実験方法

本実験では、NHAT を用い3次元角柱に対 する風直交方向の1自由度ロッキング振動を シミュレーションした。図2に実験で使用し た気流性状を示す。実験気流は、空力不安定 現象が顕著に生じるほぼ一様流に近い状態で ある。図3に実験で使用した模型と風圧セン サーの配置を示す。実験模型は、100mm× 100mm×500mm(B(見付幅)×D(奥行き)× H(高さ))の正方形角柱である。風圧センサー は、振動方向のみに配置し、片面30点(5点×



Study on Characteristics of Aerodynamic Vibration of Bluff Bodies in Smooth Flow Part1. The Concept of Hybrid Aerodynamic Vibration Technique

Wataru NANAMI Yasuhiro NAGATSUKA Makoto KANADA Eizo MARUTA

6 層)で両面合計 60 点とし、風圧センサーは、 微差圧センサーを用い模型内に内蔵した。図 4 に模型の加振装置を示す。再現される構造 物の振動は、模型脚部にある ServoMotor によ り再現される。また、この実験システムは、 スウェイ, ロッキングモードで振動するシミ ュレートも可能であるが、本論文では、 ロッ キングモードのみを対象として実験を行った。 表1に、実験の各ケースで設定した質量比、 減衰, 質量減衰パラメータを示す。対象とす る振動モデルは、 $\rho_m = 175.0 \text{kg/m}^3$ , h=2.00% を基準とし, 質量比と減衰定数をそれぞれ個 別に変化させ質量減衰パラメータを 0.1~2.0 の範囲に設定し、固有振動数は5Hzと一定と した。質量減衰パラメータは、式(1)より求ま る。

また,シミュレーションは,自由振動実験 との整合性を示すため前風速の最大値を初期 変位として与えた。解析は,サンプリングを 2msec 間隔で 20480 個取得し,応答が比較的 安定している後半の 16384 個のデータを抜き 出して分析をした。

### 4. 実験結果

#### 4.1 応答曲線とピークファクター

図 5~8 に建物密度一定, 減衰定数一定それ ぞれにおける応答曲線とピークファクターを 無次元風速に対して示す。尚、ピークファク ターは,応答振幅の最大値を標準偏差で除し た値とする。図5より本実験結果においても 共振風速 Vr=10 で渦励振が発生し、δが小さ くなると渦励振領域は高風速側に顕著な広が りを見せ, δが一定値以下の場合では, 渦励 振発生後に振動が発散するといった一般的な 三次元正方形角柱の応答特性<sup>18)</sup>と同様の傾 向となっている。これにより、ここで用いる NHAT システムの精度は良好であることが確 認できた。図6よりδが小さい状態,つまり 建物密度が軽くなる程,小さい無次元風速で 応答値が増大する傾向がある。しかし、δ= 0.2 以下では振動が収束せずに発散してしま った。また、δが小さい場合共振風速 Vr=10 より応答値のピークが高風速側にずれている。 これらの現象は、河井<sup>19)</sup>による辺長比2の実

験結果においても,減衰定数を 60 倍以上変化 させても風直交方向の空力不安定振動の発振 風速には影響を与えず,質量比に依存するこ とが示されている。更に,一般に応答卓越振 動数が固有振動数にほぼ一致する場合,その 応答量は $\delta$ に従うが,質量比が小さい場合に は応答卓越振動数が固有振動数から離れ,応 答量が質量比により大きく変化する性状が指 摘<sup>21)</sup>されている。図7より,共振風速近傍の 値が $\sqrt{2}$ に近いことから応答波形が正弦波に 近いことがわかる。またその傾向は、 $\delta$ が小 さい程,高風速域においても見られる。この 結果から応答状態を一種の定常状態として考 える事ができる。



$0_{\rm m}({\rm kg/m}^3)$	h(%)	δ	$\rho_{\rm m}(\rm kg/m^3)$	h(%)	δ		
175	0.21	0.1	18.3	2.0	0.1		
	0.42	0.2	36.6		0.2		
	0.63	0.3	54.9		0.3		
	0.84	0.4	73.2		0.4		
	1.05	0.5	91.5		0.5		
	1.25	0.6	109.8		0.6		
	1.46	0.7	128.1		0.7		
	1.67	0.8	146.4		0.8		
	1.88	0.9	164.7		0.9		
	2.09	1.0	183.0		1.0		
	2.51	1.2	219.6		1.2		
	4.81	2.0	366.0		2.0		

図8のピークファクターの値は、低い風速か らで√2 に近づいている。また、図 5,6より 両者を比較すると同じδにおいても異なる応 答特性を示すことが分かる。建物密度が一定 の場合δに因らず無次元風速9付近で立ち上 がりを見せるが、減衰定数が一定の場合,δ が小さい程,小さい風速で立ち上がる。δが 上昇すると建物密度一定の応答曲線と類似し てくる。同様に図7、8を比較すると、Vr=10 付近でピークファクターの値が√2 に接近し その後は、値が3付近に収束するなどの全体 的な傾向は一致しているものの、その性状に 違いが見受けられる。図8より同じδでも建 物密度の小さい状態では、小さい Vr で定常状 態になり、その後収束するが、質量比一定で は,長い定常上状態を示し,その後収束する。

#### 4. 2変動転倒モーメント係数

振動角柱に作用する空気力がδや無次元風 速によりどの様に変化するかを分析するため 変動転倒モーメント係数の傾向を調べた。式 (2)に変動転倒モーメント係数の定義を示す。



$$C_{mrms} = \frac{\sqrt{f(t)^2}}{\frac{1}{2}\rho V^2 BHl} \qquad \dots (2)$$

ここで、 f(t): 作用外力  $\rho$ :空気密度 V:基準風速 BH:代表面積 l:基準化長さ 図 9、10 にそれぞれ質量一定、減衰一定の無 次元風速に対する変動転倒モーメント係数を 示す。建物密度が一定の場合 Vr=10 付近でピ ーク値を持ち、その傾向はδの違いによらな い。一方,減衰一定の場合は,δが小さい程 低い風速で値が最大を示した。建物密度一定, 減衰一定の各々のδの C<sub>Mrms</sub> 曲線を応答曲線 と比較すると、応答値のピークと C<sub>Mrms</sub> のピ ークが必ずしも一致しない。応答値と C<sub>Mrms</sub> を同じδで比較すると,両者のδ=0.3以下で は、C<sub>Mrms</sub>がピークを迎え値が減少した後でも 応答値は、増大し続けており、δ=0.3以下の 振動は,他のδの振動特性とは異なる性質の 振動である事がわかる。以上より異なるδの 振動特性を総合する建物密度の大きさが深く 関係している事が分かる。



#### 5. まとめ

NHAT の原理と実際に開発したシステムを示し、質量減衰パラメータを広範囲に変化させた 空力振動実験を実施した。それらの実験結果から以下のような知見を得た。

1)本実験より,開発した NHAT システムは,空力振動現象を分析する上で十分な信頼性を有していることが確認できた。

2) *δ*=0.1~2.0 の範囲における三次元角柱の空力振動特性をシミュレーションし、従来困難とされていた *δ* の領域においても,容易に実験を実施でき、NHAT の有用性を示すことができた。その実験では、不安定振動時であっても、応答曲線、変動転倒モーメント係数などを定量的に評価することができた。

3) 応答曲線から、同じ質量減衰パラメータを有する構造物でも異なる挙動を示すことが明らか となり、δが小さい程その違いが顕著に現れる。

4)同じδでは、減衰定数の変化による影響より、建物密度の変化が振動特性に大きく影響を与 える。



### 参考文献

1)伊藤、宮田、森光:正方形角柱に作用する変動抗・揚力、第2回構造物の耐風性に関するシンポジウム、1972、pp.159-165

2)白石、松本:各種矩形断面のフラッタ時の圧力分布特性、第8回風工学シンポジウム、1984、pp.297-304

3)Kubo.Y., K.Hirata and K.Mikawa : Mechanism of aerodynamic vibrations of shallow bridge girder sections, Jour. Of Wind Eng. And Indust. Aero., Vol.41-44, 1992, pp.1297-1308

4)溝田、中村:矩形断面柱の非定常揚力と後流の変動風速について、第3回構造物の耐風性に関するシンポジウム、1974、pp.201-208

5)宇都宮、瀬尾、泉:角柱に作用する空気力に関する2・3の考察、第5回構造物の耐風性に関するシンポジウム、1978、pp.163-168

6)丸川、大熊:矩形断面構造物に作用する振動依存風力特性に関する基礎的研究、第12回風工学シンポジウム、1992、pp.201-206

7)GV.Parkinson, J.D.Smith : The square prism as an aero elastic non-liner oscillator, Quant.Journ.Mech.andApplied Math, X V II, Pt.2 1964, pp.225-239

8)Novak.M.: Galloping Oscillations of Prismatic Structures, Proc.ASCE, Vol.98, No.EM1, 1972

9)Bishop, R.E.D and A.Y.Hassan : The lift and drag forces on a cylinder oscillating in a flowing fluid, Porc.Roy.Soc.A, Vol.277, 1964, pp.51-75

10)Scanlan, R.H. and J.J.Tomko: Airfoil and Bridge Deck Flutter Derivatives, Jour.Eng.Mech.Div., ASCE, 97, No.EM6, Proc.Paper8609, 1971

11)谷池、西村:境界層乱流中における高層建築物の空力不安定振動-正方形断面をもつ高層建物の場合・、日本建築学会構造系論文集、第456号、1994、2、pp.31-37

12)須田、鶴見:高層建築物の振動時における風圧・風力性状について、第15回風工学シンポジウム、1998、pp.323-328

13)谷口徹郎:建築構造物に作用する非定常風力の評価に関する研究、大阪市立大学学位論文、2000

14)田村(哲)、伊藤:辺長比2の角柱に生じる不安定振動挙動とその空気力学的考察、日本建築学会構造系論文集、第534号、1999、10、pp.43-50

15)M.Kanda, E.Maruta, Y.Honma, K.Ueda : Development of Hybrid Experimental System Combined with Random Response Analysis for Unsteady Aerodynamic Vibration of Structure, Proceedings of 9<sup>th</sup> International Conference on Wind Engineering, 1995, pp.287-298

16)松山、神田、平田、名波、丸田:多点同時風圧計を組み込んだハイブリット振動実験システムの開発、日本建築学会技術報告集、第 22 号、2005、12、pp.139-144 17)小泉、矢作、神田、丸田:ニューハイブリット空力振動実験法を適用した高層免震建物に作用する風外力及び応答計測システムの開発、日本建築学会技術報告集、 第 23 号、2006、6

18) 天野輝久: 一様流中における三次元角柱の渦励振およびギャロッピングに及ぼす隅欠き、隅欠り効果、日本建築学会構造系論文集、第478号、1995、12、pp.63-69 19)河井宏充: 一様流中の辺長比2の3次元角柱の空力不安定振動、第16回風工学シンポジウム、2000、pp.285-290