

# 風洞実験におけるハイブリッド振動法（その2）

—高層建築物の弾塑性風応答に関する考察—

小泉 達也 川口 彰久  
(東京本社設計12部)

## Hybrid System for Evaluating Aerodynamic Forces on a Structure (Part2) —A Study on Inelastic Response of Tall Buildings during Strong Winds—

Tatsuya Koizumi Akihisa Kawaguchi

### Abstract

This report describes inelastic wind response in a wind tunnel test using a hybrid vibration system. With conventional wind-tunnel vibration tests, it is difficult to conduct inelastic wind response tests. This hybrid vibration system combines a mechanical system with a computer system, and the structure is effective for inelastic wind response research on high rise buildings. This paper aims to verify the characteristics of this system and to carry out wind tunnel tests for a smooth flow and for a turbulent flow. When the wind profile is constant, the wind response is reduced due to a shift of the building's resonance point. When the wind profile is turbulent, the wind response increases or decreases due to fluctuation of the natural period.

### 概 要

本報告はハイブリッド実験法を応用して、風外力に対する建物の弾塑性応答性状を検討可能な実験システムを紹介したものである。従来の振動実験では模型の制限等の問題から弾塑性挙動を再現することは困難である。本手法は、実験装置と応答解析とを組み合わせたものなので、弾塑性特性を組み込んだ建物の応答を調べる上で非常に有効なシステムである。ここでは、実験法を弾塑性領域まで拡張した場合のハイブリッド振動実験装置のシステム特性についての検証、および一様流と乱流中での応答特性を風洞実験により調べた。その結果、弾塑性時の風応答特性は、気流の乱れの性状によって異なる傾向があることが分かった。すなわち、一様流のように乱れが少ない気流に対し共振する場合には、周期変動によって共振が回避され応答の低減が図られた。一方、乱流中では周期変動によって、風外力が増加する場合と減少する場合があることを確認した。

### 1. はじめに

近年、建築物の大規模化・超高層化の傾向が増加しており、それに伴い設計用外力も風荷重が支配的なケースが増えつつある。その際に、建物の挙動を弾性範囲にとどめることが困難となる場合もあり、風荷重に対しても建物の塑性化を許容する設計法が必要となる。

一方、最近の耐震設計の傾向として、高層建物には何らかの制震（耐震）要素を組込むことが増えている。その制震要素を設計する上でも風荷重に対して降伏を許容することが、地震荷重に対しても効率的な設計に結びつくと考えられている。

風により構造物が塑性化することによる主な問題は、(1)建物の長周期化に伴う応答特性の変化、(2)継続時間が長いことによる部材の疲労損傷、である。

これらの問題に対して、風荷重による建物の弾塑性挙動に関する研究が始められている。

大熊・辻田ほか<sup>1)</sup>は、質点系建物を想定して、解析的に応答特性の定式化を試みた。また、田村ほか<sup>2)</sup>は振動依存風力を考慮した数値解析により弾塑性応答性状に関する検討を行った。しかし、これらの研究のほとんどは解析に基づいており、実験的に応答性状を把握した例は少ない。田村ほか<sup>3)</sup>は、実験装置に鋼材を組み合わせた振動実験を試みているが、復元力特性の再現に苦慮している。

神田・川口ほか<sup>4)</sup>が提案してきたハイブリッド振動法は風洞実験と応答解析とを組み合わせる手法なので、建物モデルに復元力特性を自由に設定することができる。

本研究では、このハイブリッド振動法を弾塑性領域まで拡張し、高層建物の風外力に対する応答性状を実験的に再現した。その方法と実験結果について報告する。

## 2. ハイブリッド振動法

### 2.1 概念

ハイブリッド振動法の概念をFig. 1に示す。ハイブリッド振動法は、強制加振機構とコンピュータを組み合わせた風洞実験装置である。すなわち、模型の基部に設置した荷重検出器が模型に作用する荷重を検知し、コンピュータはその荷重に対して応答解析を行い、その量に見合った変形を加振機に指示し模型に強制するシステムである。この操作を高速で行うことにより、風外力に対する模型の振動を再現することが可能となる。

### 2.2 ハイブリッド振動実験装置

ハイブリッド振動実験装置の機構部をPhoto1、主要な構成をTable1に示す。この装置の機構部は回転中心となるジンバル部に荷重検出器を設置(天秤装置)し、その上部に模型を取り付ける方式である。また、さらに下部にはACサーボモータの回転を直線運動に変換する機構部が二組あるので、直交する方向別に設定した動特性に従って、模型はロッキング振動することになる。

### 2.3 弾性領域での基本式

1 質点剛体模型が弾性挙動をすると仮定すると、振動方程式は、(1)式で表すことができる。

$$I\ddot{\theta}(t) + C\dot{\theta}(t) + K\theta(t) = M(t) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $I$ 、 $C$ 、 $K$  : 構造物の質量慣性モーメント、減衰、剛性、 $\ddot{\theta}$ 、 $\dot{\theta}$ 、 $\theta$  : 転倒角加速度、転倒角速度、転倒角、 $M$  : 風力による転倒モーメント、である。ところで、荷重検出器の上部に設置した模型には質量があるので、強制加振すると慣性力が発生し、その力が荷重検出器の信号に含まれることになる。そこで、模型の慣性力を応答解析により予測する手法を採用し、質量慣性係数として(2)式を定義し、振動方程式を(3)式に書き換えた。

$$\alpha = (I - I') / I \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\alpha \ddot{\theta} + 2\eta_0 \omega_0 \dot{\theta} + \omega_0^2 \theta = M' / I \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $\eta_0$  : 減衰定数、 $\omega_0$  : 固有円振動数、である。模型の質量慣性による影響を数値実験すると、Fig. 2となる。すなわち、事前に自由減衰試験から質量慣性係数を評価した後に、コンピュータに模型の質量、減衰定数、固有振動数、質量慣性係数、を入力することになる。

### 2.4 応答遅れの補正

ACサーボモータなどにより強制加振すると、指令に対して実際の挙動が遅れることが知られている。特に、周波数が高くなると顕著になる。この問題に関しては、次の(4)式を取り入れて、応答遅れを補償した。

$$x(t_0) = A \sum_{i=0}^n a_i x'(t_i) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $x(t_0)$  : 現時刻 $t_0$ の駆動部への指示値、 $x'(t_i)$  : 現時点から $i$ ステップ前の実挙動値(応答解析により求め

た結果)、 $n$  : 現時点から $n$ ステップ前、 $A$  : 振幅補正のための係数、である。堀内ほか<sup>5)</sup>は現時点と直前2ステップの3データを用いて補正する方法を採用し、係数 $a_i$ を固定値と定めている。多項式の係数を振動数に依存させると、利用するステップ数によって最適な係数を定めることができる。そこで、本件では2ステップデータ(現時点と $m$ ステップ前)を用いて係数を(5)、(6)式から算定することとした。

この係数は、正弦波の波が応答遅れ時間 $\tau$ であることを

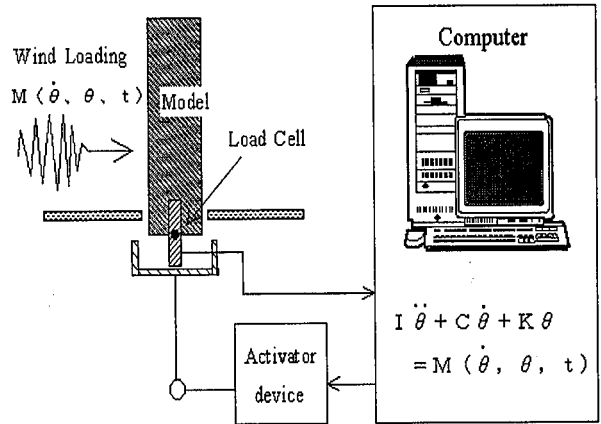


Fig. 1 ハイブリッド振動法の概念  
Concept of Hybrid Vibration System

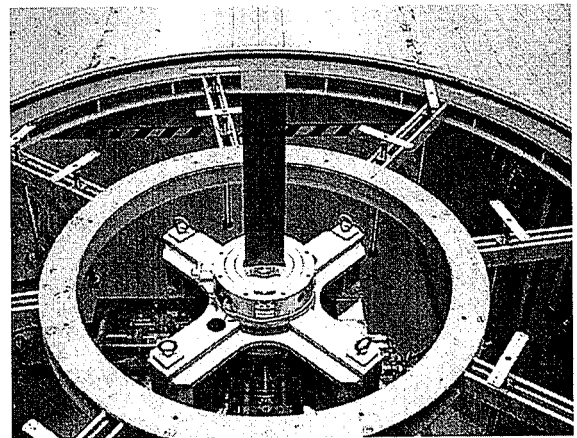


Photo 1 実験装置  
Hybrid Vibration System

Table 1 ハイブリッド実験装置の特徴  
Main System and Device

Function	System / Device
Controlling	Personal computer
	Windows 95
	A/D, D/A converter
Motioning	AC servo-motor
	AC200V, 750W
Monitoring	Force balance
	Potentiometer

考慮して、その遅れを発生させないための指示値を与えるための定義である。

$$a_0 = \sin[\omega(\tau + mdt)] / \sin(\omega mdt) \quad \dots\dots(5)$$

$$a_1 = -\sin(\omega\tau) / \sin(\omega mdt) \quad \dots\dots(6)$$

ここで、 $a_0$  : 時刻、 $t_0$  の係数、 $a_1$  : 時刻 ( $t_0 - dt$ ) の値に対する係数、 $\omega = 2\pi f_0$ 、 $f_0$  : 補正を設定する周波数、 $dt$  : 応答解析 1 ステップ当たりの時間間隔、である。係数は、時間遅れが大きい場合や利用するステップの間隔が大きい場合、あるいは時間遅れが激しいと、振動数に対して係数は大きく変化する。逆に、1 ステップ前のデータを用いる場合や、時間遅れが少なければ、補正係数の振動数に対する依存性は少なくなる傾向にある。

2.5 妥当性の検証

ハイブリッド振動実験装置に対して、質量慣性係数  $\alpha$  と応答遅れの補正法を導入したことの妥当性について検討する。自由振動波形の例を、Fig. 3 に示す。これは、ハイブリッド振動法を適用して、初期変位 (転倒角  $1/100r$  ad) を与えた時の X 方向振動 (振動数 6Hz、減衰定数 1%) の波形である。上段は実挙動 (転倒角) で、2 段目は天秤が検知した外力と、質量慣性力を除去した波形、3 段目は天秤が検知した外力に対する応答解析結果 (転倒角) である。質量慣性力を除去しても多少の外力は認められるがほぼゼロである。また、挙動から得られる固有振動数と減衰定数は、パソコンに与えた設定値に合致している。したがって、ハイブリッド振動実験装置は所定の特徴を適切に再現できていると判断する。

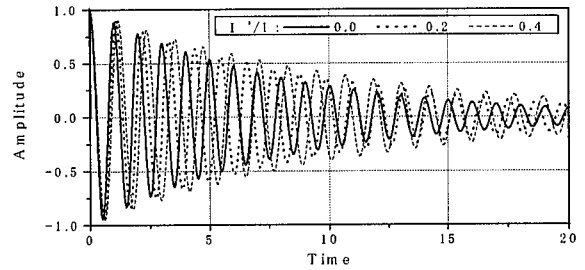


Fig. 2 質量慣性による影響  
Effect of Mass Inertia

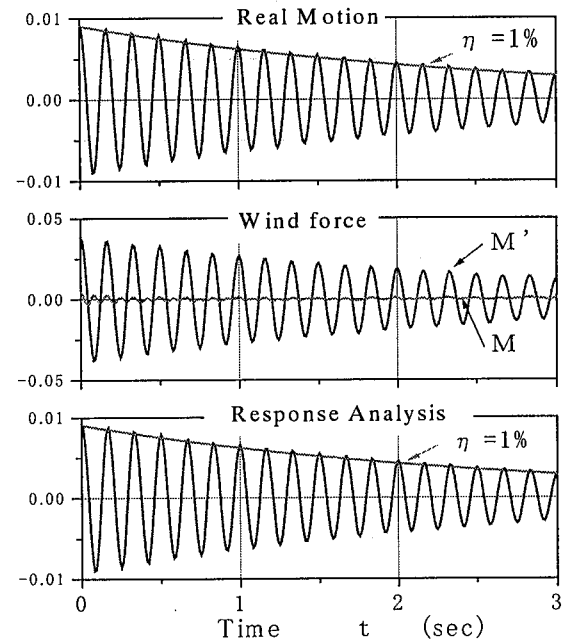


Fig. 3 妥当性の検証 (自由減衰試験)  
Verification (Free Damping Test)

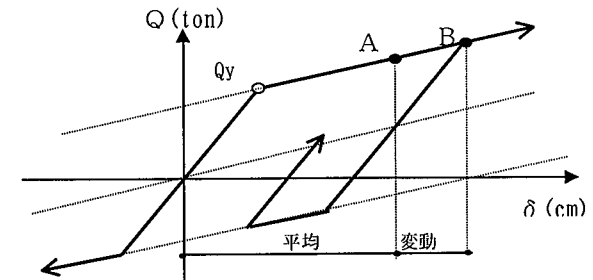
3. 弾塑性風応答の特徴

風外力に対する構造物の弾塑性挙動は、風外力の特性により大きく次の 2 種類に分類される。

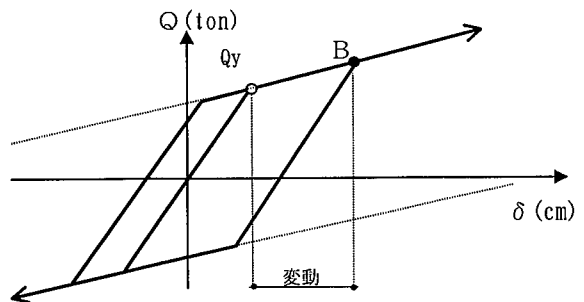
- ① 風外力に平均成分と変動成分が含まれる場合  
(主にバフエッティング振動)
- ② 風外力に平均成分が含まれず変動成分だけの場合  
(主に風直角方向振動、渦励振)

平均成分を含んでいる場合 (Fig. 4①) は、平均値 (A 点) を原点として履歴ループを描く。したがって、履歴減衰は負側の降伏変形を超える変動力が作用しない限り、期待できない。正側の降伏点を越えただけでは、見かけの剛性低下により等価固有周期は長周期側にシフトするが、履歴減衰効果は少ない。また、降伏点と平均成分の関係により履歴性状が異なることが解析的に確認されている。平均変位 A 点の荷重  $> Q_y$  の場合には変形が累積していく傾向にあり、変形制限に対する配慮が必要となる。一方、 $A 点 < Q_y$  の場合には、変形が増加することはないが、履歴減衰効果は期待できない。

平均成分を含まない場合 (Fig. 4②) は、地震荷重の場合と同様に原点周りの応答履歴となるので、履歴減衰効果が期待できる反面、履歴の繰返し回数が継続時間に依存し、



① 平均成分を含む履歴特性



② 変動成分のみの履歴特性

Fig. 4 風外力の性質による応答特性  
Characteristics of Response

高ストレス低サイクル疲労に対する配慮が必要となる。特に、風直角方向振動の場合には、風による振動時に空力負減衰効果が生じる場合があるので、履歴減衰と併せた総合的な減衰評価が必要となる。

また、実際の風外力は立地条件により卓越風向はあるが、全方向から作用する可能性があるため、両方向(風方向・風直角方向)に対する検討が必要である。

今回のハイブリッド振動実験では、外力の特性と設定する構造物の弾塑性性状の特性を実験的に確認することを目的とした。

#### 4. 弾塑性に拡張した実験システムの特性検証

まず、従来のハイブリッド振動法の解析モデルに復元力特性を追加した場合のシステム特性を調べた。

##### 4.1 実験システムの特性検証

本実験手法はリアルタイムによる疑似動的実験システムであるため、特にシステム内の時間遅れが問題となる。そこで、復元力特性を組み込んだ場合の実験システムの特性について検証する。検証項目は次の通りである。

###### ①制御の時間遅れ

パソコンからの信号をサーボモーターが受けてから作動するまでの時間と計算に要する時間を調べる。

###### ②振幅比

回転角の指令値に対する実行値の比率を調べる。

###### ③履歴ループの確認

応答が発散することなく正常なループを描くことを確認する。

①および②については、弾性時の特性は検証されているが、ここでは特に復元力特性を追加したことによる影響を調べた。③については実験の時間刻みおよび数値積分法に依存する。数値積分法にはNew-mark  $\beta$  法 ( $\beta = 0$ ) を用い、計算の時間刻みは 0.5msec とし、不釣り合い力は先送りしている。

上記の項目を検証するために、正弦波を疑似外力として実験を行った。回転角制御時の時間遅れは、モーター制御の遅れおよびメカニズム上の遅れに対して、入力振動数が最もクリティカルとなることが弾性実験により確認されているので、入力振動数に着目し強制加振による検討を行った。また、同様に回転角制御時の振幅比(実行値/指令値)についても調べた。

##### 4.2 実験対象

実験対象とした試験体形状をFig. 5に示す。想定した建物は高さ200m、アスペクト比5の正方形断面の塔状建物とした。風による建物の応答は1次モードが支配的となるので実験モデルは1質点2自由度(水平2方向)に置換した。モデルの縮尺は1/400である。モデルに想定した復元力特性はノーマルバイリニア型とし、基本的な弾塑性挙動を調べた。

復元力特性に関するパラメータは、バイリニア係数  $\alpha$  ( $K2/K1 : 0.1, 0.2 \sim 1.0 @ 0.2$ ) および降伏変形比  $\beta$  (降

伏変位  $\delta y$  / 弾性最大応答変位  $\delta e, \max$ ,  $\beta = \delta y / \delta e, \max = 0.1 \sim 1.0 @ 0.1$ ) とした (Fig. 6参照)。ただし、建物モデルの振動数は6Hz、建物密度は2795N/m<sup>3</sup>、外力の振動数は2~8Hz @ 2Hzである。また、実験の継続時間は実時間で10分間とし、実験を3セット行い結果の評価はその平均とした。

#### 4.3 実験結果

Fig. 7に強制加振実験により得られた指令から応答までの時間遅れと外力の振動数の関係を示す。同図より、応答遅れは外力の振動数に依存し  $\alpha$  の影響は小さいことがわかる。なお、 $\beta$  についても影響が小さい事が確認された。Fig. 8に振幅比と外力の振動数との関係を示す。振幅比も時間遅れと同様の傾向であることが判明した。

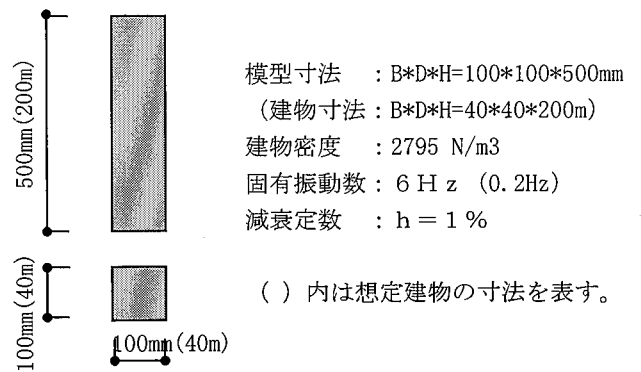


Fig. 5 実験 Model

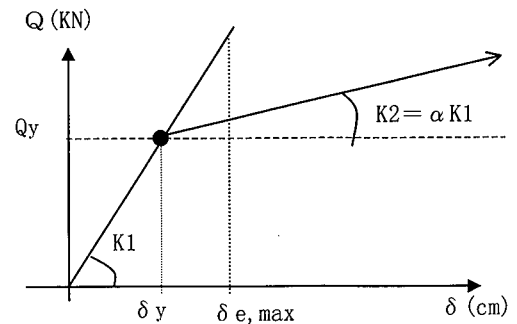


Fig. 6 実験 Parameter for Tests

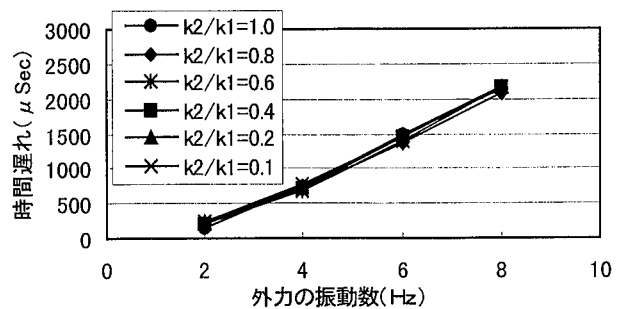


Fig. 7 時間遅れの特性 Response Delay

履歴ループ確認時の外力の振動数は上記で調べたシステム特性に基づき、時間遅れ・振幅増幅率の影響が比較的少ない3Hzとした。なお、計算の時間刻みは0.5msecとし、不釣り合い力の収束処理は行っていない。

代表的な荷重-変位関係をFig. 9に示す。いずれのケースも履歴ループは非常に安定しており、不釣り合い力による復元力の乱れは確認されなかった。

なお、計算時間はアルゴリズム上の問題であるため、振動系・外力に依存せず1 Step当たり弾性計算時470 $\mu$ sec、弾塑性計算時480 $\mu$ secとなり、履歴ルールによる影響がほとんど無いことがわかった (使用したパソコン: ペンティアム200MHz)。

5. 風洞気流による弾塑性応答実験

5.1 実験概要

実験気流は性質の異なる一様流および乱流 (地表面粗度区分IV) の2種類とした<sup>6)</sup>。実験気流の乱れ強さおよび平均風速の鉛直分布をFig. 10に乱れのスケールをFig. 11に示す。試験体に与えた復元力特性は一様流中および乱流中ともに、風方向を弾性、風直角方向を弾塑性とした場合、および風方向、風直角方向とも弾塑性とした場合である。実験ケースは下記に示す4通りとした。

- ・CASE-I: 一様流中 (ラフネス・スパイヤーなし)。実験風速は共振風速とした。
- ・CASE-II: 乱流中 (粗度区分IV)。実験風速は弾性時の共振風速以上とした。
- ・CASE-III: 乱流中 (粗度区分IV)。実験風速は弾性時の共振風速以下。
- ・CASE-IV: 実験IIIの条件で風方向も弾塑性とした。

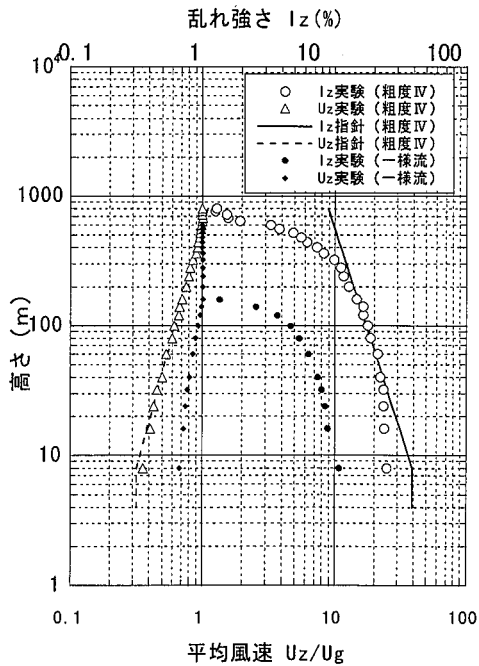


Fig. 10 風速の鉛直分布  
Wind Profile

風洞実験で想定した建物は、前述した建物と同じである。(Fig. 5参照)

実験パラメータは、頂部風速(換算風速3m/s~6m/s: 実験Iの場合のみ)および、ノーマルバイリニア型の復元力特性とした。(バイリニア係数:  $\alpha=0.2\sim1.0 @0.2$ , 降伏変形比  $\beta$ : 弾性最大応答  $\delta e, \max$ に対する降伏変形  $\delta y$ の比率,  $\beta = \delta y / \delta e, \max = 0.1\sim1.0 @0.1$ )

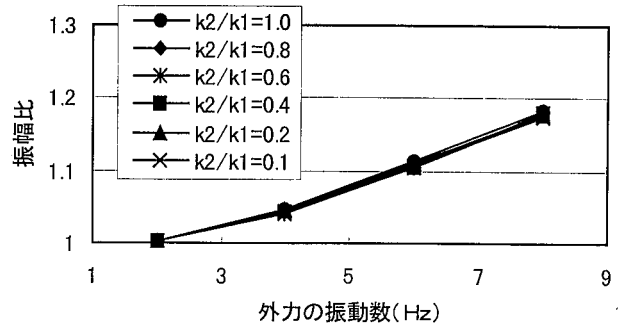


Fig. 8 振幅比の特性  
Displacement Ratio

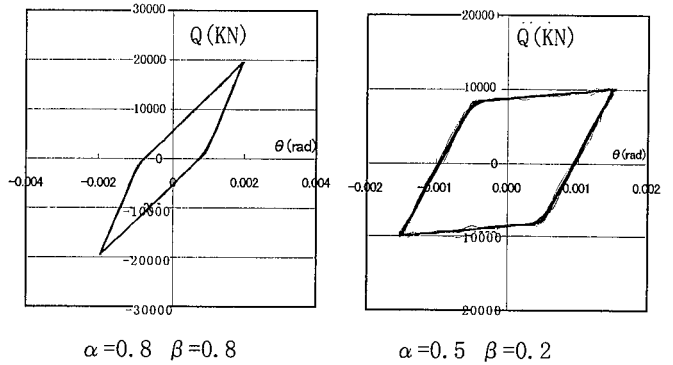


Fig. 9 荷重-変形関係  
Relation of Load-Displacement

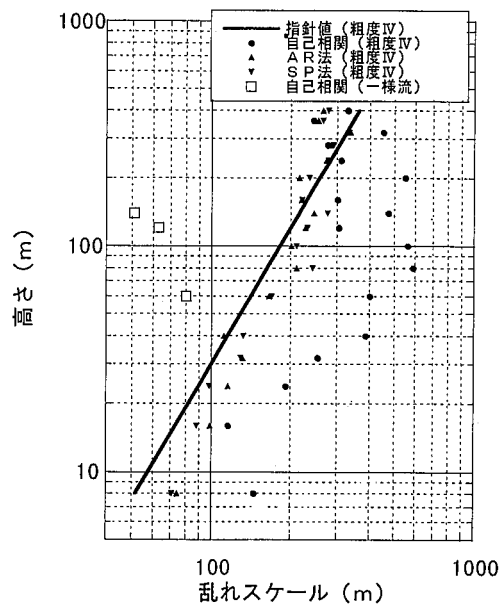


Fig. 11 乱れのスケール  
Turbulence Scale

5.2 実験結果

5.2.1 CASE-I (一様流中) Fig. 12に一様流中における風直角方向振動時の風速と応答変形角 (標準偏差) の関係を降伏変形比 $\beta$ をパラメータとして示す。弾塑性時のバイリニア係数は0.5である。

一様流中の場合には、弾性応答時( $\beta=1.0$ )に風速3.6 m/sから5.2m/sまで応答が卓越している。特に、4.4 m/s近傍では応答のピークが見られることから、この風速が共振風速であると判断できる。これに対して、復元力特性を考慮し、 $\beta$ を変化させると応答のピークが低減していることがわかる。また、応答の低減率と $\beta$ の値がほぼ等しいことから、降伏現象により周期が変動し、その結果カルマン渦との共振が回避されて、応答が低減したものと推測される。

次に、共振風速時(Fig. 12中の4.4m/s)に着目し、風直角方向の弾塑性応答実験を行った結果をFig. 13に示す。この時の実験パラメータは、バイリニア係数 $\alpha$ および降伏変形比 $\beta$ である。応答変形角を弾性応答時で基準化した応答倍率で表すと、応答倍率はバイリニア係数 $\alpha$ に関係なく、降伏変形比 $\beta$ に影響を受けることが分かる。また、降伏変形比と応答倍率がほぼ比例関係にあることと、バイリニア係数の影響を受けていないことから、応答低減効果は、周期変動により入力低減したことが原因であると考えられる。

5.2.2 CASE-II (乱流中, 高風速) 乱流中(粗度区分IV)の場合には、一様流中とは異なり明確な共振風速が現れなかったため、実験風速は一様流中の共振風速を参考に、共振風速よりも低い3.6m/s(実務で用いるレベル2風速相当, 再現期間500年)と共振風速よりも高い5.4m/s(レベル2風速\*1.5相当)とした。

Fig. 14に、高風速時の応答変形角の最大値を応答倍率で表した結果を示す。共振風速よりも高風速側で実験を行った場合には一様流とほぼ同様の傾向であった。ただし、乱流中は、風の乱れが大きいため一様流の結果よりもバラツキが大きくなっている。

5.2.3 CASE-III (乱流中, 低風速) 低風速時(LV2風速)の応答倍率を、Fig. 15に示す。応答変形角の最大値は $\beta$ に伴う変化は小さく、応答倍率は $\beta=0.3$ で極小値となった。バイリニア係数 $\alpha$ による影響は $\beta=0.3$ 以上の範囲では顕著な差は認められず、 $\beta=0.3$ 以下の範囲では $\alpha$ が小さいほど応答の増加が顕著となった。また、 $\beta=0.3$ 以上の範囲では、弾塑性応答時の最大値は、弾性応答時より低くなっている。この傾向は、辻田・大熊等<sup>1)</sup>により解析的に検討された結果と同様である。

代表的な荷重-変形関係をFig. 16に示す。 $\beta$ の値によって弾性応答を上回る場合と下回る場合があることが確認された。また、実験気流中においても、荷重-変形関係は安定したループを描いており、特に誤差等により履歴が影響を受けていることはないことがわかる。

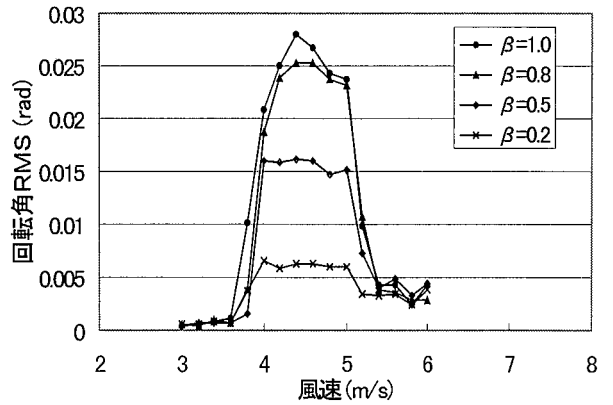


Fig. 12 風速と応答回転角の関係 (CASE-I)  
Relation of Wind Speed and Response

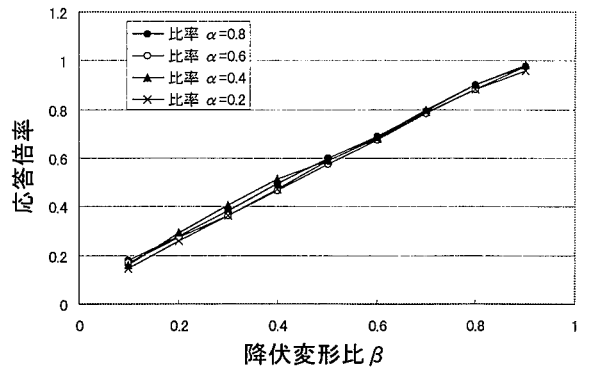


Fig. 13 応答倍率 (CASE-I)  
Response Amplitude (CASE-I)

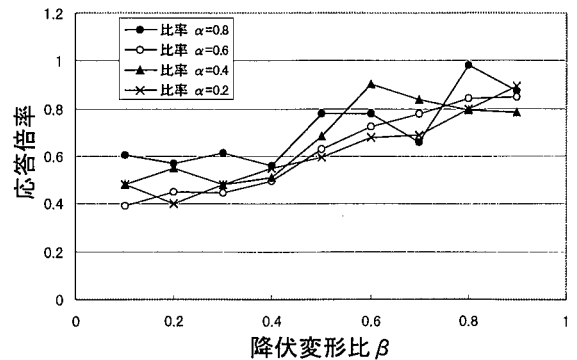


Fig. 14 応答倍率 (CASE-II)  
Response Amplitude (CASE-II)

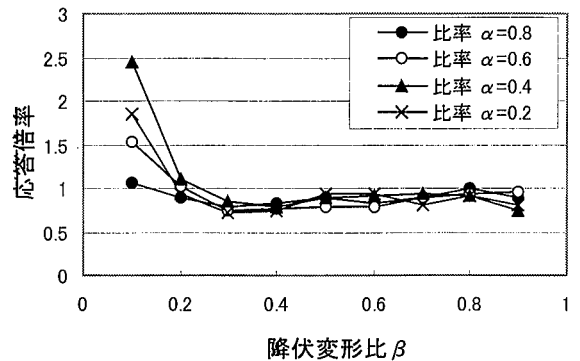


Fig. 15 応答倍率 (CASE-III)  
Response Amplitude (CASE-III)

5.2.4 CASE-IV (乱流中, 低風速, 風方向弾塑性) 風方向に対しても復元力特性を与えた場合の実験結果を, Fig. 17に示す。なお, 設定風速に対して $\beta=0.5$ のときに風方向の最大風荷重が降伏点を超え, おおむね $\beta=0.3$ で平均風荷重が降伏点を超える。Fig. 17より,  $\beta$ が0.5以上の場合には, 弾性応答と同様の結果となり,  $\beta$ が0.3を下回ると応答が急激に増大することが確認された。また, その傾向は $\alpha$ にほぼ逆比例することが判明した。

5.2.5 実験結果のまとめ 2種類の気流を用いた風洞実験より, 次のことが明らかとなった。

風直角方向に復元力特性を考慮した場合, 一樣流中では, 応答特性はバイリニア係数 $\alpha$ に依存せずに, 降伏変形比 $\beta$ に比例して応答低減される。これは, 建物のわずかな周期変動によって, カルマン渦との共振が回避されるためだと考えられる。

乱流中の場合には, 共振風速以上の場合と以下の場合で弾塑性応答特性は異なり, 共振風速以上では一樣流中とほぼ同様の傾向を示し, 共振風速以下では, 応答値は $\beta=0.3$ を境に性状が変化し, 特に $\beta=0.3$ 以下の場合 $\alpha$ が小さいほど応答値は増大する傾向を示した。今回の実験では粗度区分IVの気流を用いたが, 乱流中の風直角方向の応答特性は乱れ強さにより左右されると考えられるため,  $\beta$ の極値は気流条件により異なるといえる。

風方向に復元力特性を考慮した場合は, 降伏荷重と平均成分の関係により応答が増大する場合があることが確認された。

## 6. 考察

実験で得られた風直角方向の応答特性を応答変形のパワースペクトルから検討した。一樣流中で風速4.4m/s時の時のパワースペクトル密度をFig. 18に示す。降伏変形比 $\beta$ を小さくすると, 固有振動数はほとんど変わらずに, パワースペクトルのピーク値が低下していることがわかる。このことは, 塑性化による応答低減の理由として, 少しでも周期が変動すると共振が回避されて, その結果として入力の高減が図られたと推測する。

乱流中での応答性状についても一樣流と同様に, パワースペクトルから検討を行った。Fig. 19, 20に, 高風速時(5.4m/s)および低風速時(3.6m/s)の変動変位のパワースペクトル密度を示す。Fig. 19より, 高風速時の場合は一樣流中と同様の傾向であり顕著な周期変動はなく,  $\beta$ の低下に伴いパワースペクトル値は低下する。

一方, 低風速時の場合には,  $\beta=0.3$ 以下の場合には固有振動数の変動が顕著となる。特に,  $\beta=0.1$ の場合には急激にパワースペクトル値が増大している。これは, 一樣流中での共振風速が4.4m/sであることから, 固有振動数の低下に伴い共振風速が低下し, 結果として共振域に近づいていることが原因であると推定する。

これらの応答特性を風外力の入力エネルギーとして捉えると, 模式的に表すことができる。すなわち, 一樣流

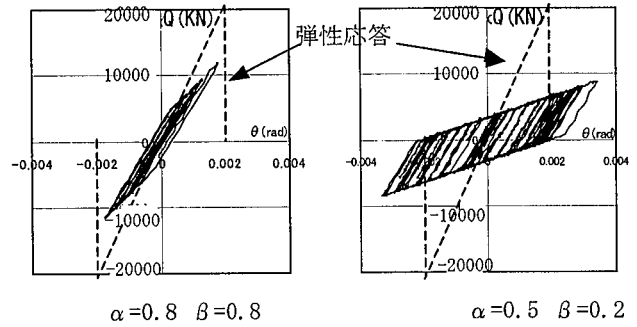


Fig. 16 荷重-変形関係

Relation of Load and Displacement

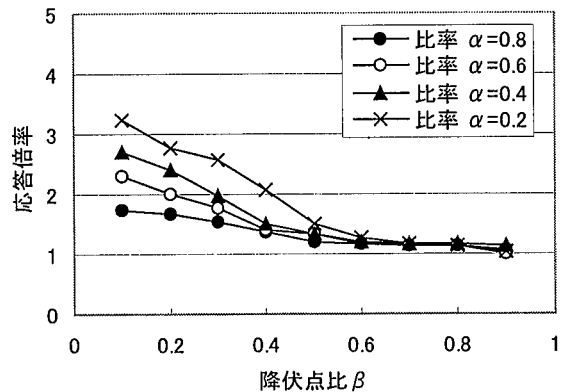


Fig. 17 応答倍率 (CASE-IV)

Response Amplitude (CASE-IV)

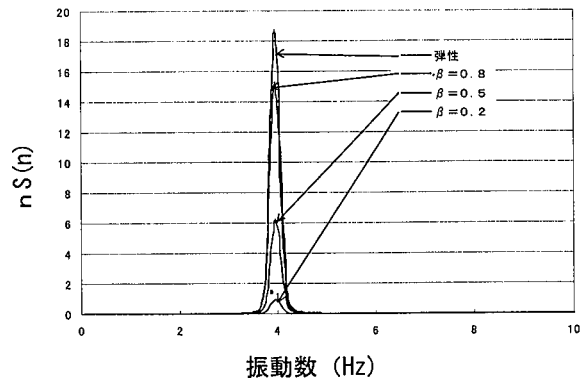


Fig. 18 応答変形のパワースペクトル(CASE-I)

Power Spectrum (CASE-I)

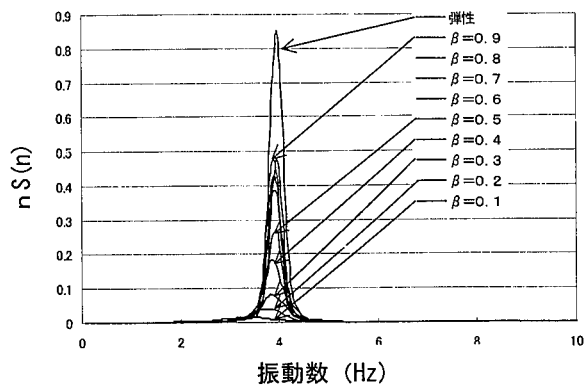


Fig. 19 応答変形のパワースペクトル(CASE-II)

Power Spectrum (CASE-II)

の場合には、Fig. 21①に示すように、風の乱れが小さいと共振による応答の増大を起しやすくなるが、共振風速域を少しでも外れると、急激に入力のパワーが減少する。したがって、周期が変動した瞬間に入力エネルギーが低下するため、応答も増大せず固有振動数もほとんど変動しないことになる。

乱流中の場合には、Fig. 21②に示すように、風の乱れが大きいので共振風速以外の風速域でも外力のエネルギーは存在する。また、共振風速と設定風速との関係により、塑性化に伴い入力エネルギーが増加して、更に応答が大きくなる領域 (図中B) と、一様流中と同様に共振を外れていく領域 (図中A) とに分けて考えることができる。すなわち、Bの領域では、応答が増加して長周期化する反面、履歴エネルギーも増加するために、見かけ上の減衰付加作用が生じる。したがって最大応答値はこの履歴減衰エネルギーと入力エネルギーの関係によって定まることになる。

通常の高層建物の耐風設計においては、風の特性は乱流であり、かつ設計風速は共振風速以下であることが多い。したがって、応答が増化する可能性のある領域となるが、降伏変形比  $\beta$  を極端に低く設定することは考えにくいので、風直角方向振動の応答に対しては問題ないといえる。しかし、風方向振動について降伏を許容する場合には、十分な変形に対する配慮が必要となる。

## 7. まとめ

ハイブリッド振動法の弾性範囲での応答特性から、本実験法の有効性を示した。また、模型の動特性を弾塑性範囲まで拡張しても、実験が可能であることを確認した。

さらに、風外力を受ける構造物の弾塑性挙動の特性として、下記のことが風洞実験により把握された。

- (1) 一様流中での渦励振状態では、塑性化すると、共振が回避され応答が減少する。
- (2) 乱流中の風直角方向振動は、風の乱れの影響が支配的となり、降伏変形比  $\beta$  が応答に与える影響が大きくなる。
- (3) 実際の高層建築物を対象に耐風設計において、弾塑性応答を想定する場合には、風方向および風直角方向の両面から応答性性状を検討する必要がある。

今後の課題として、次のことが挙げられる。

- (1) 風励起振動における応答値の増減に対する周期変動と減衰変動の関係
- (2) 塔状比の高い建物における空力減衰効果

## 謝辞

本研究を実施するに当たり、日本大学生産工学部 丸田栄蔵教授、神田亮講師に、貴重なご助力・ご助言をいただきました。ここに、深く感謝の意を表します。

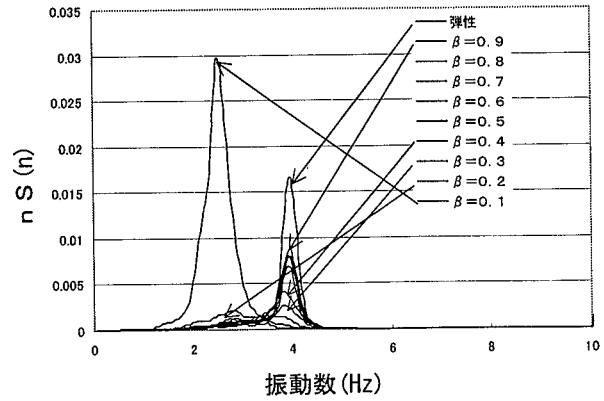
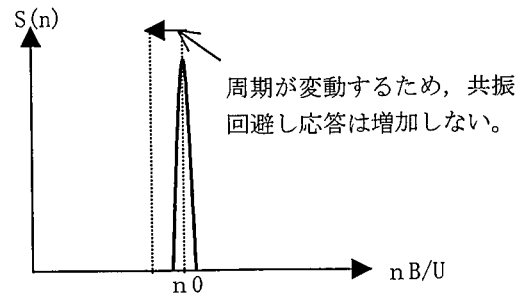
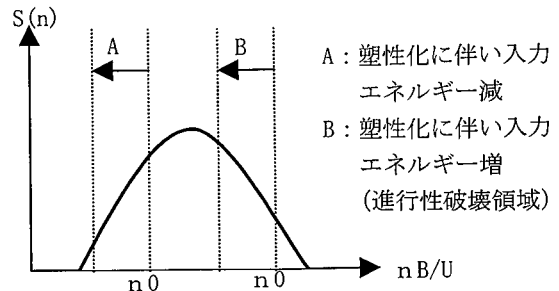


Fig. 20 応答変形の「パースペクトル」(CASE-III)  
Power Spectrum (CASE-III)



① 外力のパワーが狭帯域の場合 (一様流)



② 外力のパワーが広帯域の場合 (乱流)

Fig. 21 応答特性の模式  
Effects of Inelastic on Response

## 参考文献

- 1) 辻田, 大熊他: 「弾塑性構造物の風応答性状ならびにその予測に関する研究 (その1)」, 日本建築学会構造系論文集, 第481号, P9~16, (1996)
- 2) 田村幸雄他: 「風直角方向風力を受ける鋼構造高層建築物の弾塑性応答」, 第15回風工学シンポジウム, P485~490, (1998)
- 3) 田村哲郎他: 「渦励振時における高層建築物の弾塑性挙動に関する実験的研究」, 第15回風工学シンポジウム, P491~496, (1998)
- 4) 川口, 神田他: 「風洞実験におけるハイブリッド振動法の開発」, 第15回風工学シンポジウム, P223~238, (1998)
- 5) 堀内他: 「加振機の応答遅れを補償した実時間ハイブリッド実験システムの開発 (第1報, 補償方法と1自由度系実験への適用)」, 日本機学会論文集(C編), 61巻, 584号, (1995)
- 6) 「建築物荷重指針・同解説」, 日本建築学会, P26, (1993)