

境界層乱流中における弾塑性ダンパーを有する高層建築物の  
風直角方向応答挙動に関する風洞実験WIND TUNNEL TEST OF ACROSS WIND OSCILLATIONS FOR A HIGH-RISE  
BUILDING MODEL WITH HYSTERETIC DAMPER IN TURBULENT BOUNDARY LAYER

田村 哲郎\*, 岡田 玲\*\*, 和田 章\*\*\*

Tetsuro TAMURA, Rei OKADA and Akira WADA

As a building becomes higher and more slender, the hysteretic damper is often installed for mitigation of oscillations. However in the case that the oncoming wind velocity almost reaches the critical range of the onset of aeroelastically unstable phenomena, we encounter the unsolved trade-off problem such that a damping performance of the building surely increases, but the natural frequency tends to shift lower and resonant velocity becomes lower. So we carry out the wind tunnel experiment in order to estimate the across wind oscillations of a tall building with hysteretic damper, which is placed in the atmospheric turbulent boundary layer. We also estimate a hysteretic damping performance by investigating the relation between the static load and the deformation of a building model. Finally we compare the inelastic response under the hysteretic damping conditions with the elastic response under the equivalent viscous damping conditions. On the basis of their relation, the performance of hysteretic damper on a tall building is discussed.

**Keywords:** High-rise building, Hysteretic damping mechanism, Wind tunnel test,

Uniform flow Turbulent boundary flow, Across-wind vibration

高層建築物、履歴減衰機構、風洞実験、一様流、境界層乱流、風直角方向振動

## 1. 序論

筆者らは前報<sup>1)</sup>において、弾塑性ダンパーを有する高層建築物の共振風速近傍での応答挙動を明らかにするために、弾性ばねに支持された高層建築物モデルに対してスティック状の履歴型ダンパーを並列に設置し、それを実際に塑性化させて履歴減衰性能を再現する実験方法を構築した。また、高層建築物の後流に形成される渦によって発生する空力不安定振動に対して履歴減衰効果を検討するために、一様流中に置かれた正方形柱状構造物を対象として風洞実験を行った。その結果として、共振風速付近で発生する渦励振に対して、履歴減衰による応答レベルの抑制は大きく、降伏する応答レベルを下げた弾塑性ダンパーを用いた場合、渦励振がほぼ消失して応答が弾性時の6%にまで低下する一方で、塑性率が極めて低くなって長周期化がほとんど生じないことを示した。

一方、実際に都市部に流入する、乱れを有し鉛直方向に乱れ強さ及び平均成分が変化する境界層乱流中では、河井による減衰レベルを変化させた弾性実験結果<sup>2)</sup>によれば、渦励振は一様流のように明確には生じず、極めて低い減衰レベルでは共振風速付近から、発散的な振動に移行するものの、それ以上の減衰レベルでは漸増的に応答が増大する事が示されている。また一様流条件下において生じた減衰レベルの増大に伴う渦励振の消失及び急激な応答低下はなく、気流の乱れに

より生じるバフティング効果の存在のため応答が低下する割合が小さくなって、ある程度の応答量が維持されることが示されている。これらの研究成果を考慮すると弾塑性ダンパーを有する高層建築物の風応答も境界層乱流下では、その大きさが異なり、減衰性能が変位依存性を持つ時、動的挙動が大きく異なってくることが予想される。また、鈴木<sup>3)</sup>らは、境界層乱流中で行った多点風圧測定装置による強制加振実験による結果から求めた振動依存風力の速度同相成分は共振風速との関係及び振幅レベルに対して複雑な依存性を有することを示しており、その速度同相成分から求めた空力減衰は、低風速側から見ていったとき、共振風速周辺から急激に負に転じ、それ以上の高風速域においても、ほぼ一定の負減衰を有することを示している。すなわち、高風速域での応答量の維持には空力負減衰効果に関わることを意味するもので高層建築物の減衰性能を評価する際に、この特性への配慮を欠くことはできない。

本報では、強風作用時に支配的となる風直角方向の振動を対象として、一様流中での応答特性との対応を示しながら、乱れが含まれ、鉛直方向に勾配を有する境界層乱流中における履歴型ダンパーを設置した高層建築物に関する風洞実験を実施し、応答特性を明らかにする。更に静的に得られた履歴型ダンパーの変位-力関係を元に算定した等価減衰・剛性に基づき、応答レベルの定量的な検討を行う。特に、初期剛性を等しく

\* 東京工業大学大学院総合理工学研究科環境理工学創造専攻 教授・工博

\*\* 東京工業大学建築物理研究センター 研究生・博士(工学)  
(研究当時 東京工業大学 大学院生)

\*\*\* 東京工業大学建築物理研究センター 教授・工博

Prof., Dept. of Environmental Science and Technology, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.  
Research Student, Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.  
Prof., Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

した、弾性モデルと数種の弾塑性モデルによって空力振動実験を行うことにより、長周期化による空力不安定現象発生風速の低下に対する危険性への検討も行う。

2. 実験方法

本実験は東京工業大学総合理工学研究科所有環境流体モデリングシステム（吹き出し式エッフェル型風洞；以下本風洞）で行った。測定部断面は1.0m(w) × 0.8m(h)、測定部長は7.0m、縮流比は5:1である。

2.1 風洞実験概要

模型は一辺(B) 50mm、高さ(H) 300mm、アスペクト比(H/B) 6.0の正方形角柱である。模型にはバルサ材を用いる。振動の自由度は風直角方向に一自由度与える。実験は一様流中、及び境界層乱流中で行った。

平均風速は静圧 pitot 管、変動風速は熱線流速計：I 型プロープ (DANTEC 社：55P11) で、応答変位はレーザー変位計 (KEYENCE 社：LB-040) で測定する。データの採集はサンプリング周波数を 500Hz とし、ローパスフィルターを用いて 100Hz 以上の周波数成分をカットした。建築物の振動モードをモデル化するに当たり各層の層間変形が均一に分布するとしてロッキングモードでモデル化する。弾性時の構造減衰はシリコンオイルダンパーによって調整する。

実験気流として、一様流は、前報と同様に作製した。境界層乱流は、測定洞最上部に気流プロファイルを作製するスパイヤー及びバリアを、主に測定胴を模型設置部まで気流プロファイルを維持することを目的としてラフネスブロックを測定胴最下流まで配置した。平均風速の鉛直方向分布は、建築物荷重指針・同解説<sup>4)</sup>で示されている粗度区分Ⅳに相当する。図1aに実験風速域における(7.5m/s、10.0m/s、15.0m/s)平均風速の鉛直分布を示す。図1aの横軸は、模型設置高さにおける、平均風速で基準化した基準化風速を表している。また、縦軸は、模型高さで基準化した高さを示している。いずれの風速においても、高層建築物モデルは境界層内に入っている。その平均成分は、べき乗則で近似できており、べき指数はいずれも、0.25である。図1bは、それぞれの高さにおける風速の標準偏差を風速の平均値で割った乱れ強さの鉛直分布を示している。15.0m/sで、上空において、値が小さくなっているものの、模型設置高さ付近までは同一の鉛直分布を示している。すなわち、実験に際して風速の変化に依存しない同様な鉛直分布性状を有した気流と見なすことが出来る。図1cに、主流方向の模型頂部高さにおける変動風速のパワースペクトルを示す。図1c中には自然風のパワースペクトル密度を良好に近似するとされているカルマン型のパワースペクトルを併せて示している。(U=10m/s、模型高さ：H=300mm)今回の実験で用いた気流のパワースペクトルは、カルマン型とはほぼ一致しており、風洞内には自然風に相似するスペクトル性状を持つ気流が再現されていると判断できる。

2.2 弾塑性モデルの設定

弾塑性モデルでは弾性コイルバネに並列に弾塑性ダンパーを設置している(図2)。各弾塑性モデルでは、用いる弾性コイルバネの剛性と弾塑性ダンパーの初期剛性を合わせると弾性モデルの剛性になるようにダンパーの材長(l)で剛性を調整している(図2a参照)。なお、弾性モデルの固有振動数f<sub>0</sub>は14.6Hzである。一種類の弾性モデル(M100/0)及び弾性モデルに初期剛性の等しい4種類の弾塑性モデル(M90/10、M60/40、M50/50、M25/75)を設定している。各モデルの数字は、弾性バネの剛性と弾塑性ダンパーの初期剛性の各モデルの初期剛性に

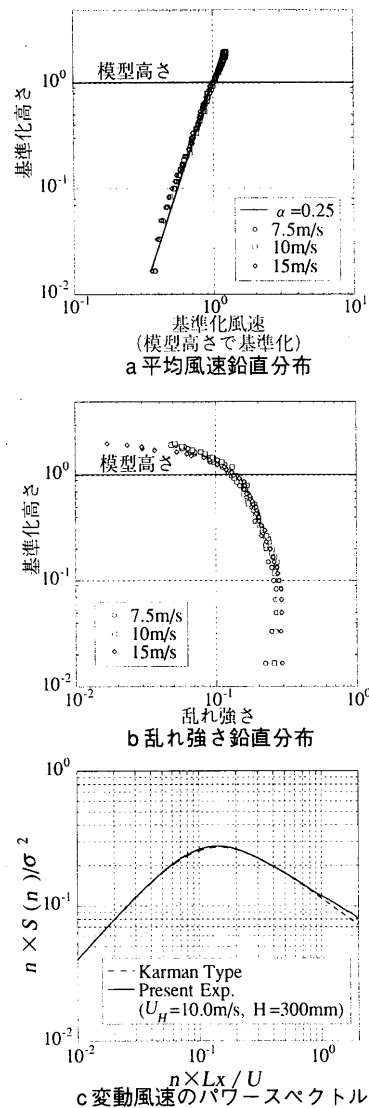


図1 気流性状

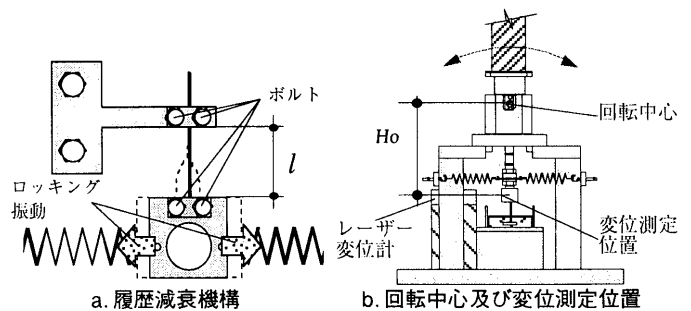


図2 実験装置概略

対する分担比率を示している。これにより降伏する応答レベルを変化させることが応答レベルに与える影響を主に明らかにできる。弾塑性モデルほど降伏レベルが小さい弾塑性モデルである。表1に各モデルの静的に測定した初期剛性と材長を、図3に静的に加力したときの変位-力関係を示す。図中で縦軸は剛性調整機構にかかる力を、横軸は回転角  $y/H_0$  [y: 測定部での応答変位、 $H_0$ : 測定部から回転中心までの距離；図2b参照]を示している。なお、弾塑性モデルの初期剛性が弾性モデルとはほぼ一致していることを静的試験及び無風時の自由振動試験を行って確認している。また各弾塑性モデルのダンパーの断面形状は同一(円形； $\phi = 0.8\text{mm}$ )である。

表1 弾性・各弾塑性モデルの初期剛性及び材長

| 実験モデル名 | 弾性バネの初期剛性 | ダンパーの材長(l) | ダンパーの初期剛性 | モデルの初期剛性 |
|--------|-----------|------------|-----------|----------|
| —      | [N/mm]    | [mm]       | [N/mm]    | [N/mm]   |
| M100/0 | 8.09      | —          | —         | 8.09     |
| M90/10 | 7.39      | 45.65      | 0.65      | 8.04     |
| M60/40 | 4.79      | 22.90      | 3.06      | 7.85     |
| M50/50 | 4.17      | 21.50      | 3.68      | 7.85     |
| M25/75 | 2.08      | 18.40      | 5.96      | 8.04     |

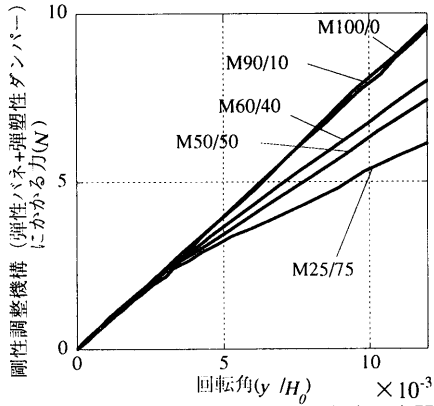


図3 弾性・弾塑性モデルの回転角-力関係

3. 境界層乱流中における弾性応答性

— 既往の実験との比較 —

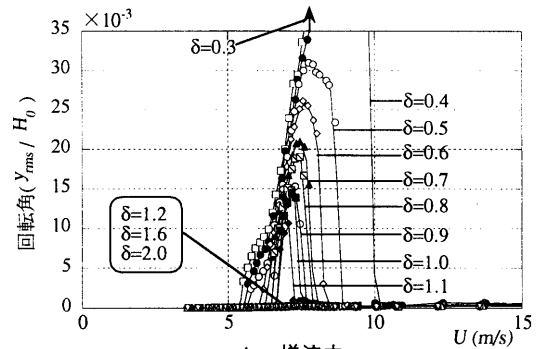
3.1 一様流条件下での応答性との比較

図4 (図4a1: 一様流中 (全体)、図4a2: 一様流中、図4b: 境界層乱流中) に弾性時の応答性 (標準偏差) を示す。横軸は一様流中では代表平均風速 ( $U$ [m/s])、境界層乱流中では模型の頂部での平均風速 ( $U_H$ [m/s]) を表し、縦軸は回転角を表している。図4a2では、図4bに示す境界層乱流中での応答特性との対応を明らかにするために縦軸のスケールを合わせて示している。本研究では、模型後流の渦発生周波数性状を見るために、模型の下流にI型プローブを設置し、高さ150mm (模型高さの半分) での流速の時系列データを同時に測定している。風速と共に上昇する気流の有する卓越振動数と、模型の固有振動数が交差する風速を共振風速と定義する。一様流中では、 $U=7.5$  m/s ( $V_f=10.3$ )。境界層乱流中では  $U_H=8.3$  m/s ( $V_H=11.3$ ) である。カッコ内は風速を模型見付幅と振動系の固有振動数で無次元化した風速である。

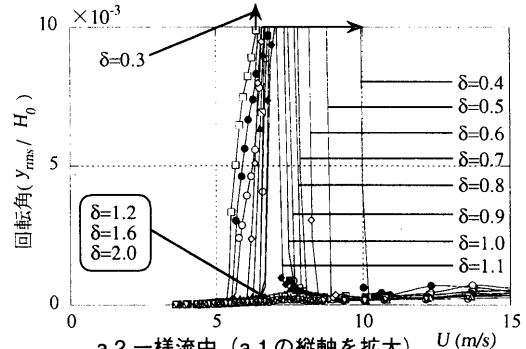
一様流中では、共振風速近傍において渦励振の発生により、著しく応答が増大し、更に高風速で共振領域からはずれると応答が急激に低下する。一方、境界層乱流中では、ほぼ同一の風速域から応答が漸次的に増大しているのが解る。また、カルマン型渦励振による顕著な応答の増大は見られず、さらに高風速でも応答は低下しないので渦励振の発生が明確ではない。ただし、質量減衰パラメータ  $[\delta = (\tilde{\rho}_m / \rho) \cdot h^3]$ 、 $\tilde{\rho}_m$ ; 一般化質量、 $\rho$ ; 空気密度、 $h$ ; 構造減衰定数] の増大と共に、応答レベルの低下が見られ、風速に対する応答の増大が緩やかになる傾向を示している。

3.2 既往の実験結果との対応

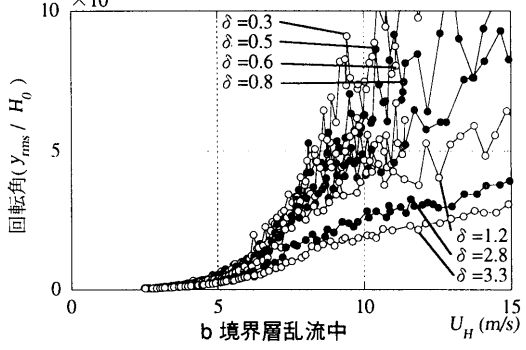
既往の実験結果における境界層乱流中における三次元正方形角柱の応答特性を概観する。それぞれに、アスペクト比、流入気流性状が異なるため、定量的な比較は行えないが、定性的な性状で対応を見る。河井<sup>2)</sup>はアスペクト比10のモデルを用いて、一様流と境界層乱流中 (粗度区分IV) の対応を示している。一様流中では共振風速付近で著しい渦励振が生じるものの、一定以上減衰レベルが増大すると渦励振



a.1 一様流中



a.2 一様流中 (a.1の縦軸を拡大)



b 境界層乱流中

図4 質量減衰パラメータによる応答特性の変化

が消失する<sup>1)</sup>。一方、境界層乱流中では低い減衰レベルでは渦励振からじかに発散的なギャロッピング振動に移行するのに対し、高減衰を与えた場合、発散的な振動には移行せずに、一定レベルに達した後の高風速域では一定の応答レベルに落ち着く。本実験では、最も減衰レベルを下げた実験においても、発散的な振動は発生しなかったものの、高減衰時の応答特性は定性的に同様の傾向が示されている。また、鈴木ら<sup>3)</sup>(粗度区分IV) は、アスペクト比8のモデルを対象に減衰レベルを変化させた振動実験を行ない、河井らと同様の傾向を示している。また、発散的な振動に移行しない減衰レベルで複数実験を行っているが、減衰が高くなっても、応答の著しい減少はみられない。また、この研究では回転角が  $5 \times 10^{-3} \sim 30 \times 10^{-3}$  の範囲で強制振動時の風圧を測定する実験も併せて行っており、共振風速以上で、負減衰が発生していることを確認している。以上示した河井、鈴木らの研究ではアスペクト比が大きく、二次元性が強いので、渦が形成されやすく、発散振動が生じやすくなったものと考えられる。一方で本研究とアスペクト比の近い既往の研究の  $\delta=1.0$  近傍における応答特性を本研究の実験結果と併せて示す(図5)。図の横軸は模型頂部高さにおける風速 ( $U_H$ ) を固有振動数 ( $f$ ) と見付け幅 ( $B$ ) で無次元化した風速である。6.0のモデルを用いた須田ら<sup>6)</sup>(粗度区分III)、及び4.2のモデルを用いた片桐ら<sup>7)</sup>(粗度区分III)の実験結果では、共振風速よりも少し低い風速から漸増的に応

答が増大し高風速でも一様流中の様に答が抑制されない傾向が示されており答性状は本実験と良い対応を示している。

以上から本研究における実験結果は一様流中と境界層乱流中での答特性の対応、減衰レベルに対する答性状の変化の観点において乱流境界層中におかれた三次元正方形角柱の答性状を捕らえていると判断できる。

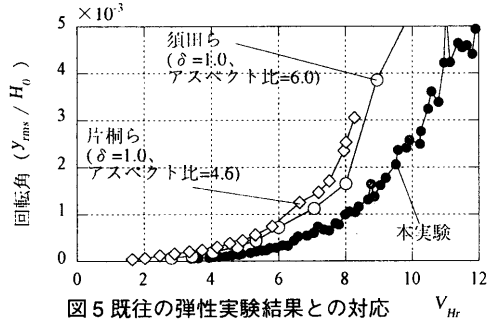


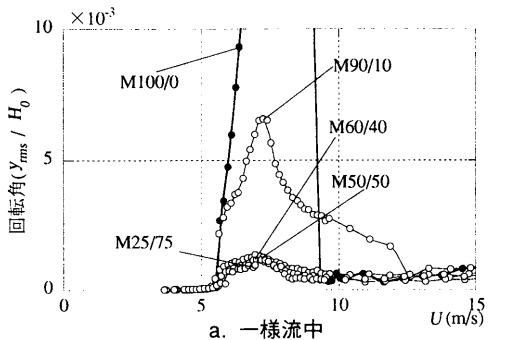
図5 既往の弾性実験結果との対応

4. 高層建築物モデルの弾塑性応答性状

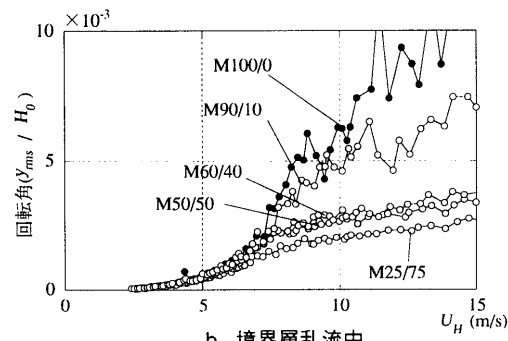
一様流中と境界層乱流中での答性状

図6 (図6a:一様流中、図6b:境界層乱流中)に弾性・弾塑性各モデルにおける答性状を示す。なお、本実験において全ての弾塑性モデルの弾性時の構造減衰による質量減衰パラメータ $\delta_s$ を0.5とする。得られた弾性モデル、弾塑性全モデルの答性状を概観する。横軸は風速、縦軸は回転角で示している。

一様流中では、いずれの弾塑性モデルも、共振風速付近の限定風速域で生じる渦励振を形成している。M60/40、M50/50、M25/75各モデルでは降伏する答レベルが低いほど若干答がより抑制されているが、ほぼ同等の答抑制効果が得られていることが解る。このことは弾塑性ダンパーの降伏する答レベルがあるレベルよりも低くなると、履歴減衰による答の抑制効果はほぼ同等となっており、弾塑性履歴型ダンパーを設置した場合、履歴減衰の変位依存性により完全には渦励振は抑制されず、ある程度以上にはダンパーの初期剛性比を高めて



a. 一様流中



b. 境界層乱流中

図6 弾性・弾塑性各モデルの答性状

も答抑制効果が上がらないことを示している。また渦励振が発生する風速は弾性モデル、弾塑性モデル全てにおいてほぼ一致している。これは、塑性率が低いため、長周期化が顕著に現れなかったためと推測される。

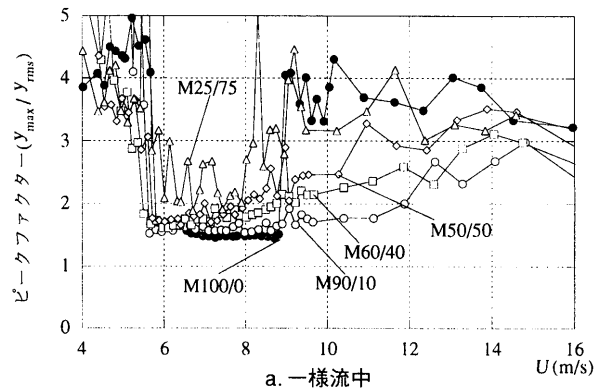
一方、境界層乱流中では粘性減衰を増大させた弾性実験と同様に高風速になるに従い答レベルが増大する傾向を示している。これは境界層乱流中では、流入気流に含まれる乱れの成分が寄与し、一様流の時のように渦の影響は明確に出ず、気流の持つ乱れ成分が影響を大きく与えているためと考える。弾塑性ダンパーの初期剛性比の高いモデルほど、答抑制効果がより顕著に現れている。本実験条件の範囲では限度が見られず、この点において一様流中と異なる。ただし辻田ら<sup>8)</sup>及び小泉ら<sup>9)</sup>の研究結果に示されているように、共振風速以下の風速域でダンパーの初期剛性分担率が高い場合に塑性化による固有周期の増大により、同一風速でも共振風速に接近し入力エネルギーの増大に伴うことを原因として、弾性振動時の答を上回るような現象は本実験結果では見られない。これは、図3で示すように本実験では、低い答レベルから塑性化し、履歴減衰効果が固有周期の変化による影響を上回るためであると考えられる。

5 履歴減衰と答の時間変化

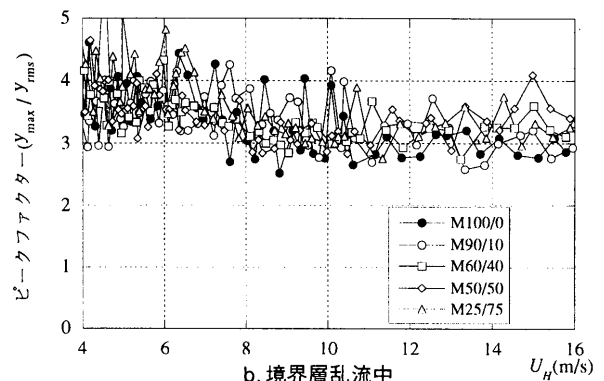
ここでは変位依存性を有する履歴減衰の答振幅性状に与える影響を、まずピークファクターとして概観し、さらに答の時刻歴波形を元に考察する。

5.1 履歴減衰が答のピークファクター・時刻歴波形に与える影響

図7に一様流中(図7a.)、境界層乱流中(図7b.)での弾性・弾塑性各モデルのピークファクターの風速に対する変化をそれぞれ示す。一様流中では図6で見られる後流に出来る交番渦を原因とした渦励振が生じている風速域で、ピークファクターが他の風速域に比べて顕著に低下し



a. 一様流中



b. 境界層乱流中

図7 ピークファクターの風速に対する変化

ている。一方境界層乱流中では全風速域を通してピークファクターは3~5を示しており、振幅は安定していない。特に、 $U_H=6\sim 8\text{m/s}$ を境にそれより低い風速（以下低風速域）では、4近辺を。高い風速（以下高風速域）では3~4の範囲で推移している。前述した6~8m/s周辺でピークファクターが変化することに対して、模型の応答振動数性状と、模型高さの半分において後流に出来る渦の周波数性状の風速に対する変化をパワースペクトルを用いて卓越周波数を比較して考察する（図8）。境界層乱流中では、物体の後流渦による強制振動を原因として生じる渦励振は明確には生じていないが、図8b、cに示すように、共振風速周辺でロックイン現象が生じている。モデルの応答周波数性状が、低風速域では図8aに示すように応答波形のパワースペクトルに接近流の持つ周波数成分とモデルの固有振動成分が併存しているため、波形が乱れてピークファクターが3~4を示し、高風速域では、図8dに示すように固有振動成分のみで卓越し、気流の乱れにより、その周辺にパワーが集中しランダムな振動になるため、ピークファクターが3に接近しているものと考えられる。

変位依存性を有する履歴減衰が応答振幅性状の安定性に与える影響を検討するために、弾性・弾塑性モデルの応答振幅性状を明らかにする。シリコンオイルによって弾性時の構造減衰を変化させた場合の応答特性については文献1で検証しているように、 $\delta=1.1$ を超えると渦励振が間歇的に消失し、不安定な挙動を示す。図9a~cは一樣流中の、図9d~fは境界層乱流中の応答波形を示している。図9aにM100/0、図9bにM90/10、図9cにほぼ同一の応答性状を示したそれ以外の三種の弾塑性モデルの代表として、M25/75の渦励振最大応答時の一樣流中での応答波形を示し、同様に図9dにM100/0、図9eにM90/10、図9fにM25/75の境界層乱流中の応答波形を示している。一樣流中での弾性モデルでは、応答振幅が安定しており、綺麗な正弦波を形成しているが、それに対しM90/10では、わずかに波形が乱れており、M25/75では極めて不安定な応答振幅性状を示しており降伏するレベルが低い弾塑性モデルほど乱れた応答振幅性状を示している。それに対して境界層乱流中ではいずれのモデルでもほぼ同様の応答振幅性状を示している。

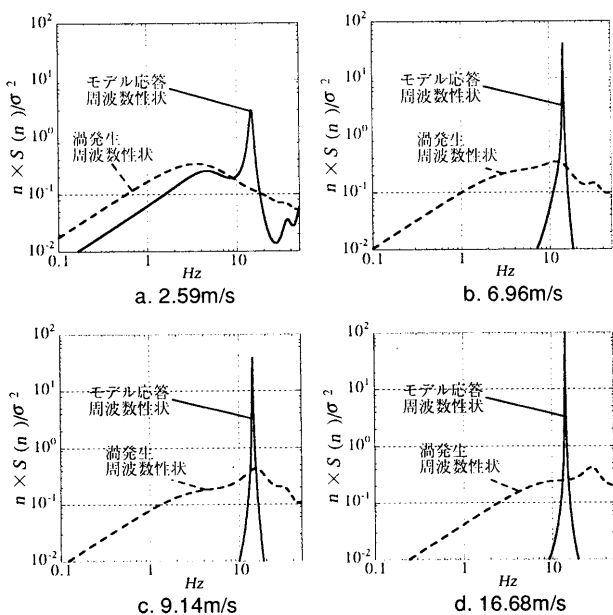
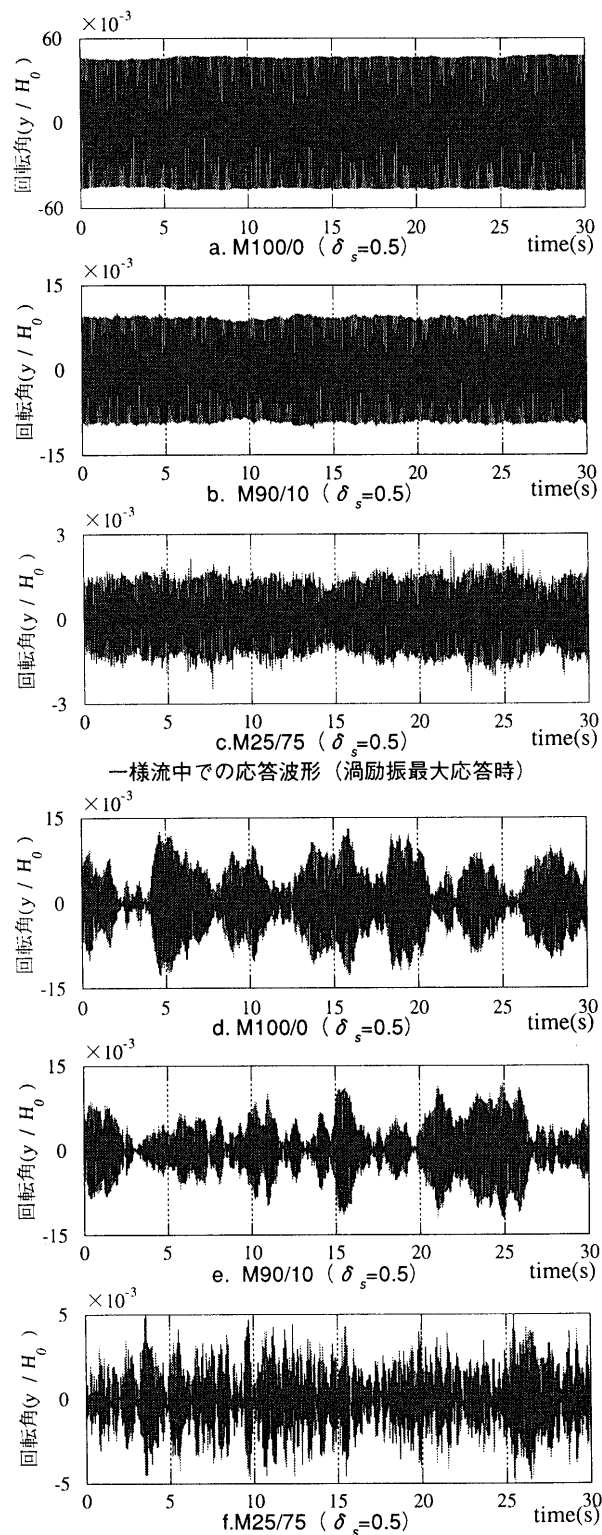


図8 模型の応答波形と後流渦の周波数性状の風速に対する変化（弾性振動時）



境界層乱流中での応答波形 ( $U_H=8\text{m/s}$ : 共振風速付近)  
図9 各モデルの応答振動波形

### 5.2 各種減衰の影響

前節をふまえて更に、乱れを有する境界層乱流中での変位依存性を有する履歴減衰の応答振幅性状に与える影響を見るために、図4bの、 $\delta=3.3$ の時の応答特性と図6bのM25/75の標準偏差で評価したときの風速に対する応答レベルの変化がほぼ一致している点に着目し、両者の応答特性を比較する。図10aにM100/0 ( $\delta_s=0.5$ ) の、図10bに付加弾性モデル ( $\delta_s=3.3$ ) の、図10cにM25/75 ( $\delta_s=0.5$ ) の特徴的な波形例を示す。ここでは、風速が共振風速より高い場合 (15m/s 近辺) で

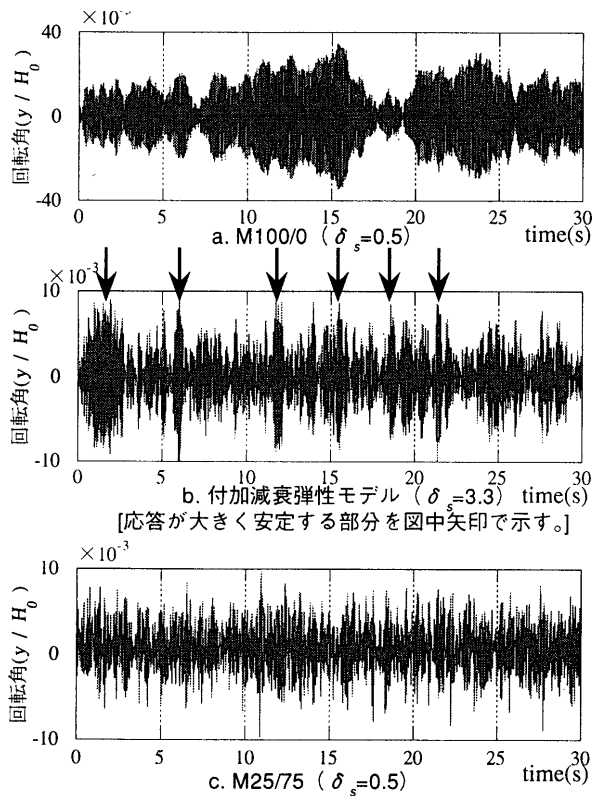


図10 境界層乱流中での各モデルの応答振幅波形(15m/s)

の振動波形を示している。縦軸は回転角だが、図10aのみ応答波形の振幅性状を見るために縮尺を変えている ( $-40 \times 10^{-3} \sim 40 \times 10^{-3}$ )。M100/0 ( $\delta_s=0.5$ ) では、時間を追って振幅レベルの変動はあるものの、原点を中心として綺麗な振動波形を形成している。変位依存性を有さないシリコンオイルダンパーによって、振動系の減衰レベルを高めた付加弾性モデル ( $\delta_s=3.3$ ) では、減衰の増加による応答の低下によって、波形が乱れるが、間歇的にM100/0 ( $\delta_s=0.5$ ) に近い応答振幅性状を示すのに対し、M25/75 ( $\delta_s=0.5$ ) では、常に波形が乱れて推移している。図11に図10で示した、境界層乱流中における各モデルにおけるピークファクターの風速に対する推移を示す。三者とも定性的に共振風速付近から値が低下する傾向がある。一方、定量的に見ると、ほぼ同等の値を示す中でも、付加減衰弾性モデルの値は、ロックイン領域以上ではM100/0 ( $\delta_s=0.5$ )、M25/75 ( $\delta_s=0.5$ ) の値よりも大きい値で推移する傾向が定性的に見られる。これは、付加減衰モデルではM100/0 ( $\delta_s=0.5$ )、M25/75 ( $\delta_s=0.5$ ) の両方の状態が現れるため空力不安定振動が間歇的に現れる(図10b. 中矢印群)ため、最大値が不安定振動時のピークでカウントされるためにピークファクターとして評価すると値が大きくなると考える。

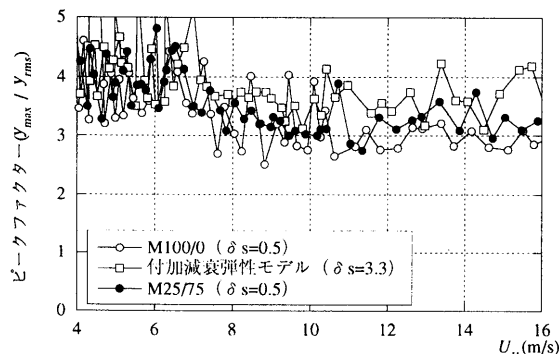


図11 境界層乱流中における各モデルのピークファクター

6. 弾塑性ダンパーによる振動特性の変化とそれに基づく応答評価

空力弾塑性振動実験で得られた応答レベルまで加力したときに得られる弾塑性ダンパーの回転角-力関係を静的に求め、その結果から得られる履歴減衰による減衰性能の増大及び周波数シフトに関する特性を示し、得られた回転角-力関係から等価の概念を用いて弾塑性実験の応答レベルを定量的に評価する。

6.1 静的試験による変位-力関係

本報では、M60/40とM25/75における空力弾塑性実験の応答特性と静的に得られた復元力特性の対応を示す。図12に一樣流及び境界層乱流中における応答変位の最大値と風速の関係を示す。これらの応答性状を参考にM60/40においては  $15 \times 10^{-3}$ 、M25/75においては  $12 \times 10^{-3}$  まで  $3 \times 10^{-3}$  ピッチで正負繰り返しの漸増载荷を行った。なお、再現性を確認するために同一振幅レベルにおいて二回ずつ加力している。その加力計画を図13に示す。

図14に得られた回転角-力関係を示す。横軸は回転角、縦軸は履歴減衰機構及び弾性バネを並列に配置した、剛性調整機構にかかる力で表している。いずれのループも同一のレベルで二周加力した曲線は一致しており、ダンパーとして安定した性状を示しているのがわかる。一樣流中で示された両弾塑性モデル共に、最大応答レベル ( $3 \times 10^{-3}$ ) では、履歴ループの面積はほとんどなく、塑性化が進んでいない。それに対して、境界層乱流中における応答レベルまで加力した場合、図13に示されているように履歴ループの面積が大きくなり、塑性化が進んでいることが解る。

6.2 塑性化による振動特性の変化

また、周波数シフトに関して周波数性状を示す。図15(図15a: 一樣流中、図15b: 境界層乱流中) に振動応答波形のパワースペクトルを示す。実験で得られた全風速の応答振動波形からパワースペクトルを求め、性状を比較した。本報では、最も降伏する応答レベルの低いM025/075を対象に5m/s、共振風速、15m/sの応答波形のパワースペク

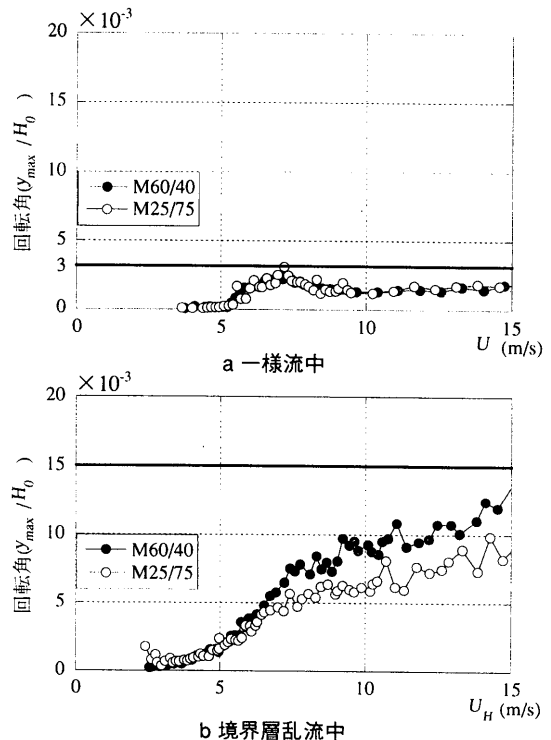


図12 M60/40、M25/75の応答性状(最大値)

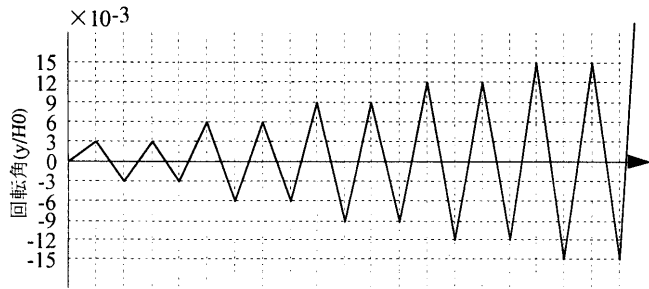


図13 加力計画

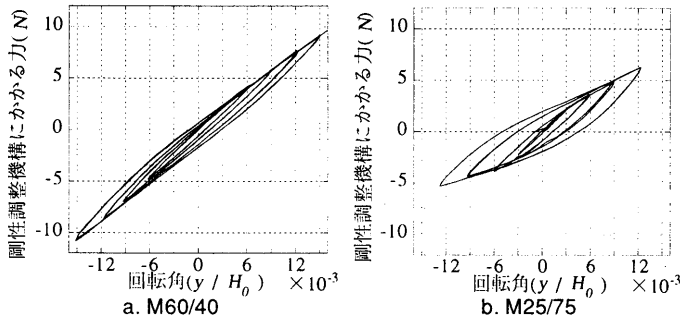


図14 静的な回転角-力関係

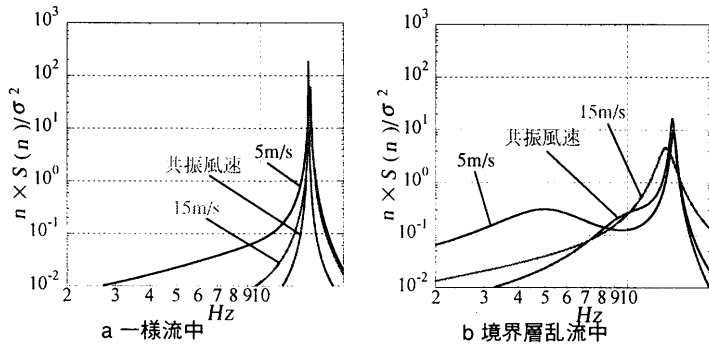


図15 応答変位のパワースペクトル(M25/75)

トルを示している。一様流中では最も応答が増大する渦励振領域でも弾性時の固有振動成分が卓越しており、最も急峻な形状になる。さらに高風速域でも固有振動成分が卓越し、長周期化は起きていない。それに対して境界層乱流中では、共振風速付近で一旦スペクトルが急峻な形状になるが、高風速になるに従ってスペクトル形状がブロードになると共に、固有振動成分が長周期化により低振動数側にシフトしていくのが解る。

以上により、一様流中では減衰レベルの増加にともなう渦励振の消失を原因として、ほとんど塑性化が進行していない事に対して、境界層乱流中では、その気流に含まれる乱れ成分の寄与により、顕著な塑性化が現れ、系の振動特性が変化することを確認した。

6.3 等価剛性、等価減衰による弾性応答との対応

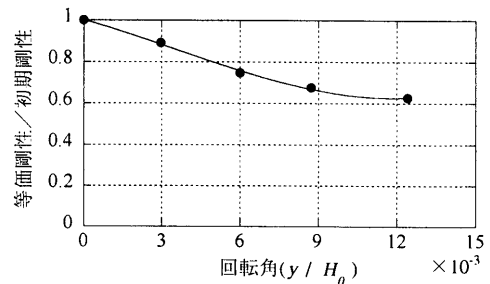
空力弾塑性実験で得られた応答レベルの妥当性を検討する。ここでは、M25/75の応答レベルを検討する。そのために、以下の波形の特性を比較する。

- ① M25/75の応答特性
  - ② 弾性モデルに、等価剛性・等価減衰を加味したモデル（以下付加弾性モデル）の応答特性
- なお、この種の評価に与える空力減衰の影響は慎重に対処しなければならない。ここでは、弾塑性挙動により生じる周波数シフトに対する

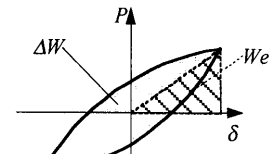
空力減衰レベルの変化を除去するために、鈴木<sup>3)</sup>らの示した空力減衰の変化がほとんどなくなる風速として高風速域[15m/s]を対象に検討を行う。

図16に回転角と、静的加力試験結果から求められる弾性時の剛性で基準化した等価剛性（図16a）及び  $\delta_{all}$ （図16c）（ $\delta_{all} = \delta_s + \delta_h$ ； $\delta_{all}$ ；全体質量減衰パラメータ、 $\delta_h$ ；履歴減衰パラメータ）との関係を示す。なお、等価剛性は、割線剛性から求め、等価減衰は、(1)式を元に算出した<sup>10)</sup>。(1)式において、 $\Delta W$ は一サイクルの消費エネルギー、 $W_c$ は最大ポテンシャルエネルギーを表している（図16b参照）。

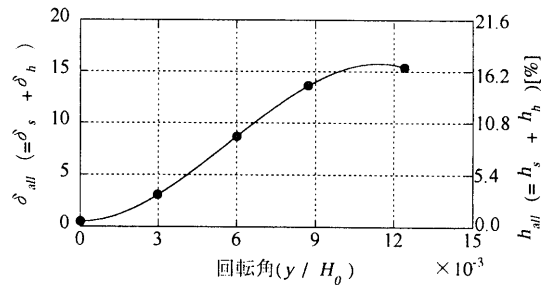
$$\delta_{eq} = \left( \frac{\bar{\rho}_m}{\rho} \right) \cdot h_{eq} = \left( \frac{\bar{\rho}_m}{\rho} \right) \cdot \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W_c} \tag{1}$$



a. 回転角と弾性時の剛性で基準化した等価剛性の関係(M25/75)



b. ΔWとWeの定義模式図



c. 回転角と  $\delta_{all}$  の関係 (M25/75)

図16 回転角と基準化剛性・ $\delta_{all}$ の関係

この関係から求められる、風速 15m/s における M25/75 の応答回転角は（標準偏差）は  $2.76 \times 10^{-3}$  であり、それに対応する等価剛性比（等価剛性の初期剛性に対する比率）は 0.88、 $\delta_{all}$  は 2.77 である。以上を加味すると、M25/75 の応答回転角は、風速 13m/s（ $\approx 15.0 \times 0.89$ ）、 $\delta = 2.8$  の弾性モデルでの応答回転角と等価であればよい。図 4b に示す  $\delta = 2.8$  の付加減衰モデルの該当風速の応答回転角は、 $2.98 \times 10^{-3}$  であり等価の概念を用いて、弾塑性実験結果の応答レベルの妥当性を弾性実験結果で示した。

## 7. 結論

初期剛性を等しくした、弾性モデル及び数種の弾塑性モデルを対象として、境界層乱流中・一様流中における弾塑性ダンパーを有する高層建築物の応答挙動に関する風洞実験を行い、その応答性状を明らかにした。さらに弾塑性モデルの応答レベルを定量的に評価するために静的な応答レベルー力の関係を明らかにし、等価的に求めた履歴減衰及び周波数シフトを考慮した弾性モデルとの対応を示した。

### 1. 弾性応答性状

1.1 一様流中では共振風速近傍で顕著な渦励振が発生し応答が顕著に増大するが、それ以上の風速域では応答が増大しない。これに対し、境界層乱流中では、一様流中における渦励振発生風速付近から応答が漸増的に増大し、高風速域にまでその傾向が維持される事が解った。

1.2 減衰レベルを増加させたとき、一様流中では一定以上の減衰レベルでは、空力不安定現象が急激に消失し、渦励振が発生しなくなるのに対し、境界層乱流中では応答レベルが徐々に低下していく傾向が示された。

### 2. 弾塑性応答性状

2.1 一様流中で共振風速近傍で生じる渦励振は、弾塑性ダンパーの初期剛性比が一定以上、高い場合には履歴減衰による応答の抑制効果が顕著になっており、弾塑性履歴型ダンパーを設置した場合、完全には渦励振は抑制されず、ある程度以上にはダンパーの初期剛性比を高めても応答抑制が効果的にならないことを示している。これに対し、境界層乱流中では弾塑性ダンパーの初期剛性分担率の高い弾塑性モデルほど実験を行った範囲内で応答レベルが低下する傾向があることが明らかになった。

2.2 境界層乱流中では弾塑性モデルと等価な粘性減衰を付加した弾性モデルを比較したとき、等価な減衰を付加した弾性モデルでは間歇的に正弦波が出現するのに対し、弾塑性モデルでは、継続的に不規則な振動波が形成される。このため、ピークファクターは弾塑性モデルの方が低い傾向が見られる。

### 3. 回転角ー力関係

3.1 一様流中では渦励振最大応答レベルにおいても履歴曲線の囲む面積が小さく履歴減衰が明確に現れていないのに対して、境界層乱流中では、その気流に含まれる乱れ成分の影響で履歴ループの面積が大きくなり、塑性化が進行した。このことは、応答波形のパワースペクト

ルにも現れており、風速が上昇することに対して応答卓越周波数は、一様流中ではほぼ変化しないのに対して境界層乱流中では明確に低下している。

3.2 空力負減衰の風速に対する依存性の低い高風速域においてM25/75を例に、弾塑性モデルと、弾性モデルに等価減衰、等価剛性を加味したモデルの比較を行った。その比較において標準偏差で評価すると、良い対応を示していることがわかった。従って空力減衰の適切な評価が可能であれば、結論2.2で示した知見も併せて弾性実験結果及び設置する履歴型ダンパーの静的な変位ー力関係から、弾塑性モデルが示す応答性状を把握することの可能性が示された。

### 参考文献

- 1) 田村哲郎、岡田玲、和田章：弾塑性ダンパーを有する高層建築物の共振風速近傍での応答挙動に関する風洞実験、日本建築学会構造系論文集、第537号、pp.35～41、2000.11
- 2) 河井宏允：高層建築物の渦励振、ギャロッピング、フラッター、第12回風工学シンポジウム論文集、pp.267～272、1992.12
- 3) 鈴木雅靖、田村哲郎：風方向を有する場合の正方形角柱に作用する振動依存風力とその評価、日本建築学会構造系論文集、第529号、pp.51～58、2000.3
- 4) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説、日本建築学会、1993
- 5) 天野輝久：一様流中における三次元正方形角柱の渦励振およびギャロッピングに及ぼす隅欠き、隅切りの効果、日本建築学会構造系論文集、第478号、pp.63～69、1995.12
- 6) 須田健一、鶴見俊雄：隅欠き範囲の異なる矩形平面建築物の風振動性状の差異、第14回風工学シンポジウム論文集、pp.359～364、1996.12
- 7) 片桐純治、勝村章、丸川比佐夫：辺長比による高層建築物の風直角方向及び捻れの風応答性状の変化に関する研究、第15回風工学シンポジウム論文集、pp.473～478、1998.12
- 8) 辻田修、早部安弘、大熊武司、和田章：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ーその1 風直角方向振動の場合ー、日本建築学会構造系論文集、第481号、pp.9～16、1996.3
- 9) 小泉達也、川口彰久、神田亮、丸田栄蔵：ハイブリット振動法に基づく高層建築物の弾塑性応答に関する考察、第16回風工学シンポジウム論文集、pp.429～434、2000.12
- 10) 柴田明徳：最新耐震構造解析、森北出版株式会社、1981

(2000年12月10日原稿受理、2001年5月7日採用決定)