

## 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

### WIND TUNNEL TEST ON DYNAMIC BEHAVIOR NEAR RESONANT REGION FOR HIGH-RISE BUILDING MODEL WITH HYSTERETIC DAMPER UNDER STRONG WIND

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, its natural frequency becomes lower due to the insufficiency of stiffness comparable to the building height. In the case of installation of the hysteretic damper, although the building has a damping performance, the natural frequency tends to shift lower due to large response. Consequently, the velocity of oncoming wind is apt to reach the critical range for the onset of vortex-induced oscillations. In order to realize detailed investigation by the wind tunnel technique, we present the experimental device, consisting of a stuck model and a yielding rod for a high-rise building with hysteretic damper. After grasping the fundamental characteristics of dampers, we discuss aero-elasto-plastic behavior of a tall building near resonant region to vortex-induced oscillations.

**Keywords:** High-rise building, Aero-elasto-plastic behavior, Hysteretic damping mechanism,  
Wind tunnel test, Uniform flow, Across-wind vibration

高層建築物、空力弾塑性挙動、履歴減衰機構、風洞実験、一様流、風直角方向振動

#### 1. 序論

高層建築物が大きな地震動を受けるとき、地震入力エネルギーは鋼材の塑性変形能力に期待した履歴型ダンパーに集中して吸収させ、鉛直荷重を受け持つ柱・梁などの主構造体は弾性域に留めようとする損傷制御設計法<sup>1)</sup>と呼ばれる耐震設計法が多く使われている。耐震性能に注目した場合は、比較的低い応答レベルから履歴型ダンパーを降伏させてエネルギー吸収能力を高めた方が効果的である。耐風性能に注目した場合、履歴型ダンパーの塑性化は構造物全体の固有周期を長くするため固有周期が風直角方向風力スペクトルのピークを与える周期に近づき入力エネルギーが増大する、地震の継続時間に比べ強風の継続時間は長い、履歴型ダンパーに疲労問題が生じる、風方向に構造物が振動する場合、風方向の風圧力には平均成分があるため、構造物の変形が一方に偏って進行してしまう、など多くの問題が指摘され<sup>2)</sup>、強風時に履歴型ダンパーの降伏を許容することについては今後様々な視点から検討されなければならない。特に、一番目の問題については、建築物が高層化してももとの固有振動数が低下し、共振風速が設計風速に近づいた条件では、建築物において渦励振あるいは不安定振動の発振風速へ到達する可能性が増大する。建築構造物が万が一こうした不安定現象へ移行した場合、構造物の崩壊につながるため構造設計者にとっては深刻で、こういった現象の発生機構に対する詳細な認

識あるいは応答に対する確実な予測ができない限り、慎重な対応にせまられることになる。塑性化によって固有振動数が変化する割合について、辻田<sup>3)</sup>による模擬風力を用いた風直角方向振動時系列シミュレーションでは条件によって2割以上低下するという結果が得られている。したがって不安定振動を想定した弾塑性ダンパーの問題を検討することの意義は十分にあるものと考えられる。

ここでは渦の影響が強い風直角方向振動を取り上げ、履歴型ダンパーの塑性化による構造物の1次固有周期の増加により共振風速が低下するため、設計風速に接近あるいは到達して発散的な振動を呼び起こすのか、履歴型ダンパーの塑性化による履歴減衰が有効に作用しこれらの応答を抑制することが出来るか、などに注目し、弾塑性ダンパーを持つ高層建築物モデルを用いた風洞実験を行い、これらの風応答性状を解明する。

#### 2. 既往の研究と本研究の位置づけ

損傷制御設計法に基づいた高層建築物の弾塑性風応答特性に関する研究例として辻田等の研究<sup>3)</sup>が挙げられる。辻田等は、先に述べたシミュレーションの他に、弾塑性応答量として変動振幅の確率密度分布をエネルギー的な観点から導き、最大応答を簡便に予測するための確

\* 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

\*\* 東京工業大学大学院総合理工学研究科環境理工学創造専攻 大学院生・工修

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

率統計的手法を提案している。この研究では共振風速以下を対象としており、高層建築物と周辺気流の相互作用を特に考慮していないが、風直角方向振動の場合、降伏レベルをある大きさより低く設定すると長周期化により入力エネルギーが強まり、弾性時よりも応答が増大する場合があることを示している。

また、高層建築物と周辺気流の相互作用も考慮した弾塑性応答特性に関する研究が最近報告され始めている。例えば大熊等は二次元並進振動をする弾塑性モデルを対象として、風洞実験から求めた振動依存風力に基づき、時刻歴応答解析<sup>9)</sup>を行い、履歴減衰機構により空力不安定振動における発散的挙動も抑制できることを確認した。他にも、この問題に対する数値解析的アプローチが試みられ、同じ二次元並進モードで振動する弾塑性モデルを対象に、振動方程式と流体現象を記述する Navier-Stokes 方程式・連続式を連成させて解くことにより応答特性を検討している<sup>9)</sup>。この研究では、共振風速の直前ではダンパーの降伏レベルによっては長周期化の影響で応答が増大する一方、共振風速に達すると長周期化による無次元風速の増大がピークを与える無次元風速まで上回り、むしろ応答が減少することなど、共振風速近傍において履歴型ダンパーが応答特性に与える効果が定性的にも異なってくることを明らかにしている。

一方、筆者ら<sup>10)</sup>は、一自由度ロックモードで振動する三次元モデルを対象とした空力弾塑性振動実験装置を考案・製作し、その装置の弾塑性挙動に関する基本的特性を確認すると共に、風洞を用いた空力振動実験により、基本的な平面形状である正方形平面を有する弾塑性構造物を対象として周辺気流の相互作用まで考慮に入れた風応答挙動に関する基礎データを提示している。

以上を踏まえて、本研究は、空力不安定現象が発生する高風速域まで考慮に入れ、弾塑性ダンパーによる高層建築物の制振効果を明らかにすることを目的とし、先の空力弾塑性振動実験装置を用いた風洞実験をさらに進め、ダンパー機構の基礎的なデータを整理した上で、実験結果に基づき弾塑性ダンパーを有する高層建築物モデルにおいて塑性化が応答特性に与える影響、ダンパーによる不安定振動の回避の可能性、及びダンパー設計時に重要な指標となる塑性率などに関連する事項を詳細に論じるものとする。なお本報で用いた実験法は、通常風洞気流により引き起こされる外力が微小であることを考慮し、非線形な弾塑性挙動を再現かつ制御可能にする細いダンパー鋼材を実際に組み込んだ装置を用いるものである。振動の自由度は正方形柱に於いて空力不安定振動時に支配的となる風直角方向一自由度とし、また流入気流条件については、空力不安定現象の特徴を際立たせる意味でも風外乱の影響は入らないように、まずは一様流とする。

### 3 実験方法

弾塑性ダンパーを有する高層建築物をロックモードで振動する三次元角柱にモデル化した実験装置の機構及び原理を示すと共に、行った風洞実験の概要を示す。

#### 3.1 実験装置

弾性治具の概要を図1に示す。空力振動実験にはロックング振動装置を用いた。この装置はジンバル機構を中心にして回転振動する。(以下、回転部分を総称してジンバルと称する。)回転慣性はジンバル上部に設置した模型の頂部に取り付けた付加質量で、構造剛性は弾性バネで、構造減衰はジンバル下部に設置するシリコンオイルダン

パーで調整する。

弾塑性治具の全体図を図2に、弾性・弾塑性両実験で剛性を調整する箇所の概略を図3に示す。弾塑性治具は、弾性治具にダンパー機構を付加して設計した。主構造体の剛性を調整する弾性コイルバネに並列にダンパー機構を配置する(図3参照)。このように配置した場合、初期剛性は主構造体とダンパーの剛性の和になり、またダンパーに構造物の変形が直接伝わるためダンパーの効果が大きくなる等、設計上の利点を有する<sup>7)</sup>。

ダンパー鋼材は円形( $\phi=0.8\text{mm}$ )のステンレス鋼線(SUS304-W1)を用いている。鋼材の一端を振動するジンバルに、他端を既存の弾性治具フレームに、鋼材固定金具 [Parts1,2; 図2中] でボルトにより固定する。ダンパー鋼材の固定方法は文献<sup>6)</sup>に示す。ジンバルの振動でダンパー鋼材に剪断力がかかり両材端が曲げ降伏することにより弾塑性挙動をする。ダンパーの剛性は材長で調整する。材長の調整は Parts2 を治具フレームに固定した材長調整用レール金具 [Parts3] に設置し、Parts3 の長穴に沿ってスライドさせて行う。

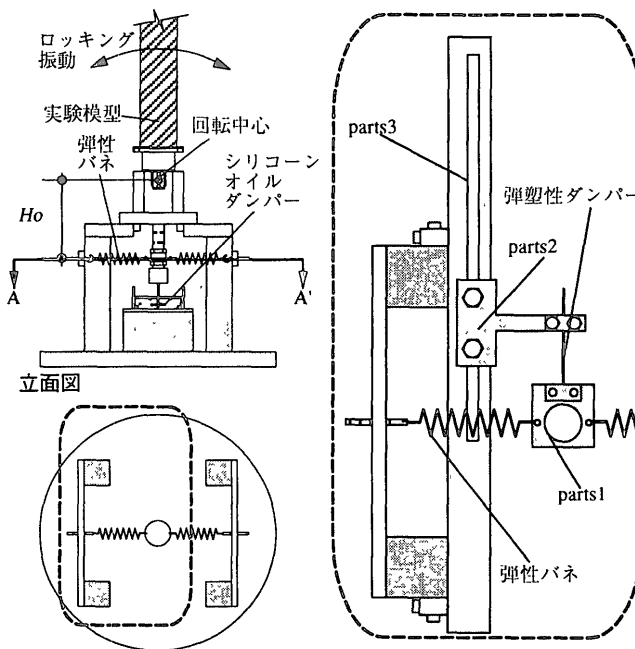


図1 弾性治具概要

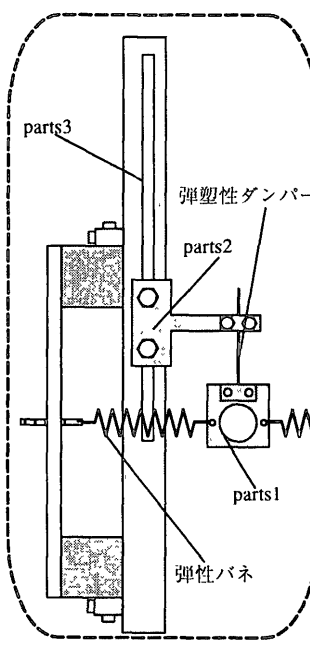


図2 弾塑性治具概要

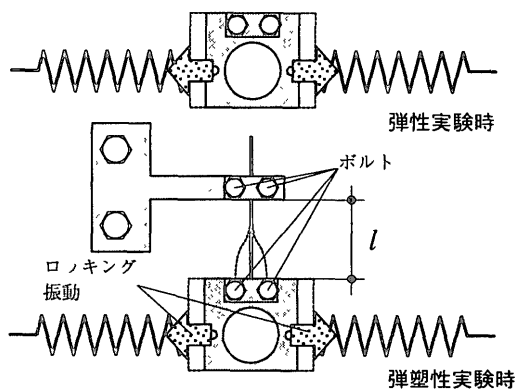


図3 ダンパー機構概略

3.2 風洞概要、実験模型及び測定方法

本実験は東京工業大学総合理工学研究所所有の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・図4、以下本風洞）を用いて行った。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。実験気流は乱れ強さ ( $I = \sigma / U$ ,  $\sigma$ : 風速の標準偏差、 $U$ : 平均風速) が0.3%以下の一様流である。図5に模型を設置していない状態での模型設置部の主流方向の基準化平均風速及び乱れ強さの分布を示す。風洞壁面に発生する境界層の影響は模型設置位置周辺では

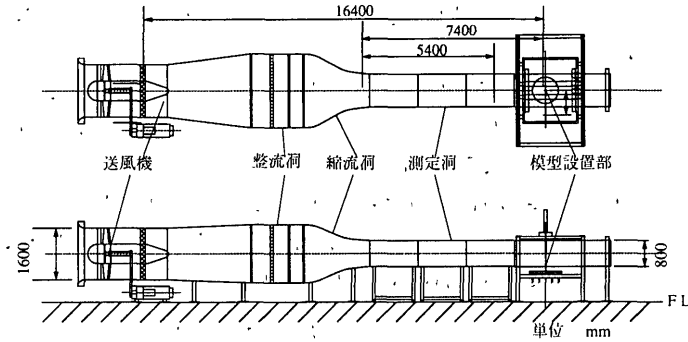


図4 風洞装置概略

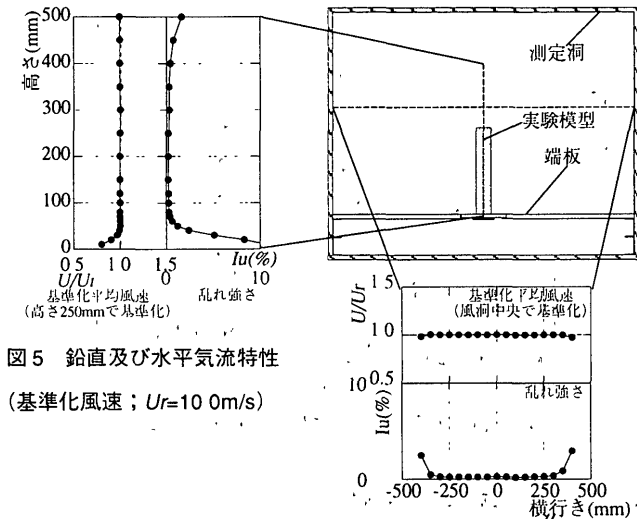


図5 鉛直及び水平気流特性  
(基準化風速;  $U_r = 10.0 \text{ m/s}$ )

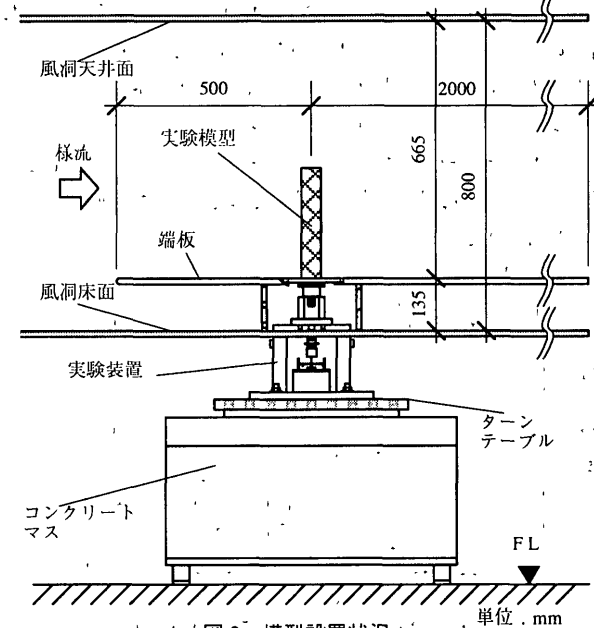


図6 模型設置状況

認められない。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。材質はハルサ材を用いた。模型の設置状況を図6に示す。風洞床面に生じる境界層を避けるために模型設置位置上流500mmより、端板を設置した。

流速はI型プローブ(DANTEC社: 55P11)で、応答変位はレニザー変位計(KEYENCE社: LB-040)で測定した。データ採集は、サンプリング周波数: 500Hz、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、適切な制振部材の配置を前提として塑性化による損傷集中は無いものとし、ロッキングモードを対象とする。

4 履歴型減衰機構の基本的な弾塑性挙動の確認

製作した履歴減衰機構の基礎的な弾塑性挙動を確認するため無風時に静的・動的条件下において検討を行った。

4.1 静的加力試験 (静的な弾塑性挙動の確認)

履歴型減衰機構の静的な弾塑性挙動を静的加力試験により確認した。この試験は空力振動実験で用いた2種類の剛性を有する弾性バネのうち、剛性が低い方の弾性バネ (弾性弱バネ) と弾塑性ダンパーを設置した状態で行った。あらかじめ、約10gのおもりを0.01gの精度で作成し、順次載荷する。一回の載荷ごとに変位を測定し、変位-力関係を得た。

図7(a)に弾性弱バネの、図7(b)に弾性弱バネと弾塑性ダンパーを設置したとき及び弾性強バネの回転角-荷重関係を示す。図7中に於いて縦軸はダンパーにかかる力、横軸はジンバルの回転角である。この試験では風洞を用いた空力弾性実験で測定された最大応答回転角  $[y/H_0 = 30 \times 10^{-3}; y$ : 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1参照)]まで正負交番で静的に加力した。ダンパーの初期剛性 ( $k_p = 0.36 \text{ kg/mm}$ ) は2種類の弾性バネの剛性 ( $k_1 = 0.30 \text{ kg/mm}$ ,  $k_2 = 0.66 \text{ kg/mm}$ ) の差になる様に設計している。従って弾性弱バネの剛性が主構造体の剛性 ( $k$ ) を、また剛性の強い弾性バネ (以下弾性強バネ) の剛性 ( $k_2$ ) が建築物の応答振幅が増大しても塑性化を起こさない場合の剛性となる。図7(c)に示す様に弾性弱バネの剛性と弾塑性ダンパーの初期剛性の和が、弾性強バネの初期剛性に一致しているのがわかる。なお、この場合の弾塑性ダンパーの剛性は弾性強バネの剛性の6/11となっており、その時の弾塑性ダンパーの材長は21.5mmである。(以下、21.5mmの弾塑性ダンパーをD215、それを用いた空力振動実験をL215とする。) 静的加力試験は正負交番3回加力した。3周共にほぼ一致した関係が得られたので、図中では併せて示している。静的条件下で安定した再現性が得られた。

なお、初期剛性に関して理論値 (ヤング率;  $E = 20000 \text{ t/cm}^2$  とし、両端固定として計算) との比較を行ったが良い対応が示しており、ダン

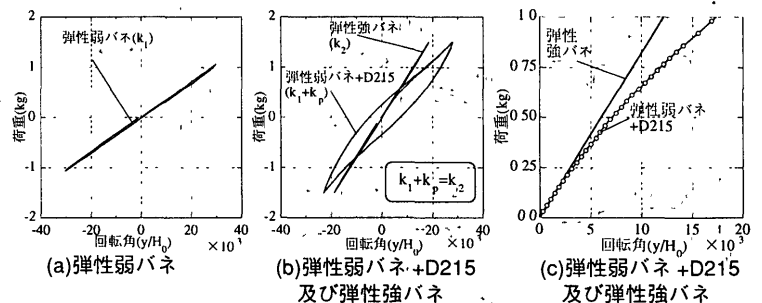


図7 静的な弾塑性ダンパー及び弾性バネの回転角-荷重関係 (括弧内は初期剛性)

パー鋼材の両材端が固定されていることを確認している。

4.2 自由振動試験（動的な弾塑性挙動の確認）

履歴型減衰機構の動的な弾塑性挙動の確認を行うために空力振動実験治具を風洞内に設置して無風時に初期変位を与え、自由振動させる自由振動試験を行った。（これは従来の空力弾性振動実験で減衰定数を求めるときに採られる手法である<sup>9)</sup>。）この試験を、弾性強バネ及び弾性弱バネ+弾塑性ダンパーを設置した状態で行っている。

図8に弾性・弾塑性両振動時の波形を示す。両図中では、同じ振動波形の中から振幅が大きい部分と小さい部分の振動波形を重ね合わせ振動特性（振幅の変化、位相差）が見やすいように、図の左端で位相及び振幅を調整している。弾性振動時の大小両振幅の波形は重なっており、減衰定数、固有周期共に両振幅域で一致しているのに対し、弾塑性振動時に於いては大振幅振動時の方が塑性化の影響により長周期化し、減衰の大きな波形となっている。

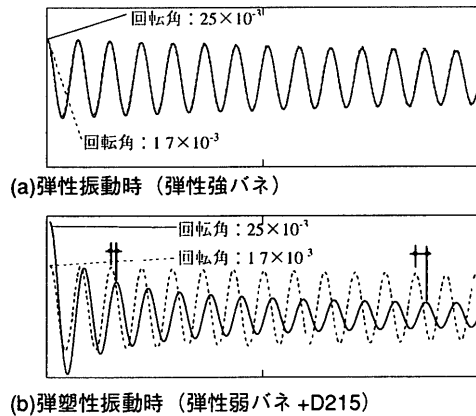


図8 自由振動試験による自由振動波形

図9に自由振動波形から求めた弾性・弾塑性両振動時の回転角振幅と $\delta_{all}$ 、振動周波数の関係を示す。[ $\delta = (\tilde{\rho}_m / \rho) \cdot h^3$ ,  $\tilde{\rho}_m$ : 一般化質量、 $\rho$ : 空気密度、 $h$ : 構造減衰定数、 $\delta_{all}$ は構造質量減衰パラメータ $\delta_s (=0.5)$ と履歴質量減衰パラメータ $\delta_h$ の和である。また、この図では高い応答レベルで一周期振動する間の振幅減衰が大きいので一周期ごとに $\delta_{all}$ を算出し、回転角は最初の半周期分の回転角で代表して評価した。]弾性振動時は、 $\delta_{all}$ ・振動数共に回転角に対して一定であるが、弾塑性振動時には回転角が大きいほど長周期化し、また減衰レベルも上昇している。ただし、回転角に対する変化は緩やかである。また、回転角が $2 \times 10^{-3}$ と低い値においても弾性時の振動数、 $\delta_{all}$ とは若干の差が認められる。

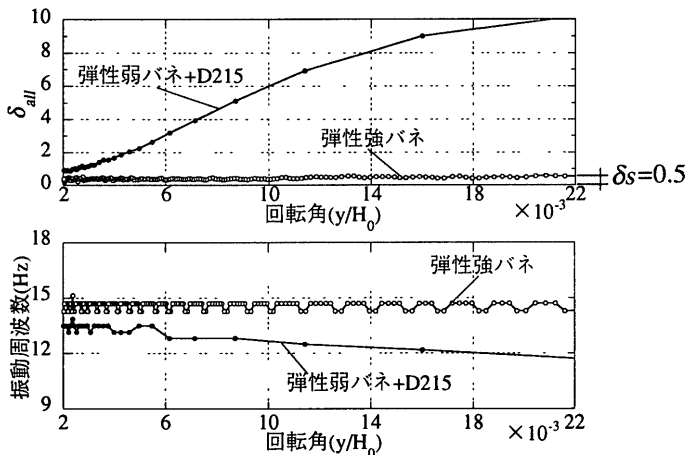


図9 自由振動波形による回転角と $\delta_{all}$ ・振動数の関係

5. 空力弾性振動実験（本実験に於ける応答特性の検証）

既往の研究によれば、一様流中でロッキングモード振動をする三次元正方形角柱について以下の特徴が得られている。 $\delta$ が一定値（1.5周辺）よりも小さくなると共振風速である無次元風速10近辺に、限定風速範囲内で生じるカルマン型渦励振と呼ばれる空力不安定現象が生じる。この減衰レベルにおいて、高風速側でのギャロッピング振動は文献内に示された実験風速範囲内で確認できない。さらに、 $\delta$ が小さくなると、渦励振領域は高風速側に顕著に広がり、 $0.5 \geq \delta$ では渦励振領域から風速を上げて直接ギャロッピング振動に移行し、応答は収まらない<sup>10)</sup>。

一方本研究での弾性実験から得られた質量減衰パラメータを変化させた時の応答特性を図10に示す。図中において、横軸は無次元風速( $V_r = U/(f \cdot B)$ :  $U$ : 風速、 $f$ : 固有振動数、 $B$ : 見付け幅)である。本実験結果では $V_r = 10.0$ 周辺で渦励振が発生する、 $\delta$ が一定の値以下の場合に渦励振から直接ギャロッピング振動に移行するなど、上述した三次元正方形角柱の応答特性とはほぼ同様な特性が得られている。

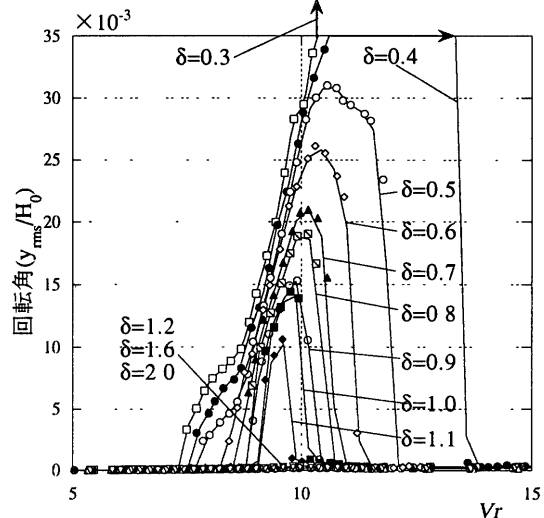


図10 質量減衰パラメータによる応答特性の変化

6. 空力弾塑性挙動の安定性の確認

ここで示した方法で得られる弾塑性挙動のロバスト性を確認するために材長の等しいダンパー鋼材(D215)を3本用意し、それぞれを用いて空力弾塑性実験を行ったときの応答性状を図11に示す。標準偏差で評価すると、その3者は渦励振が発生する風速及び渦励振時の最大応答レベル共にほぼ一致している。また風速を変化させた時の応答も概ね重なり、製作した履歴減衰機構は空力弾塑性振動挙動に対して、良好な再現性を示している。

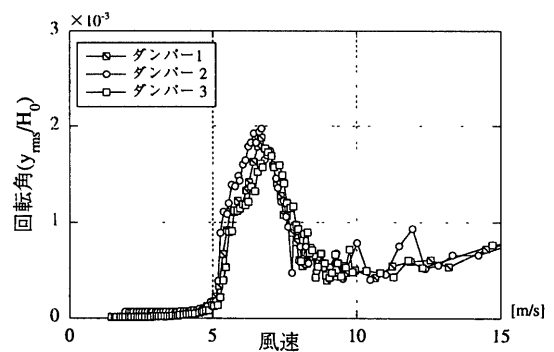


図11 空力弾塑性実験における再現性(L215)

7 初期剛性の等しい弾性モデル（弾性強バネ）と弾塑性モデル（弾性弱バネ + D215）の応答特性の差異

従来の高層建築物の耐風設計は、設計風速を共振風速よりも低い風速下として行われている。しかし履歴型弾塑性ダンパーを設置した場合、履歴減衰による制振効果が期待される一方で、塑性化により構造物の固有周期が増加するため共振風速が低下し、空力不安定現象が発生して応答が増大する事が予測される。弾塑性ダンパーを設置した場合に、大振幅の振動が発生するのか、逆に抑制されるのか明らかにするために、初期剛性が等しい弾性モデルと弾塑性モデル(L215)の空力不安定振動時の応答特性を比較する。

7.1 履歴型ダンパーの塑性化が応答特性に与える影響

図12に両モデルの風速-応答レベルの関係を示す。弾塑性モデルでは、弾性コイルバネの剛性が主構造体の剛性を表している。弾性コイルバネの剛性と弾塑性ダンパーの初期剛性の比は5:6である。弾塑性モデルの渦励振時における最大応答レベルは弾性モデルの8%にまで低下する。履歴減衰により弾塑性モデルの減衰性能が上昇し、渦励振は著しく抑制されており、強風下においても履歴型ダンパーによる制振が効果的であることを示している。

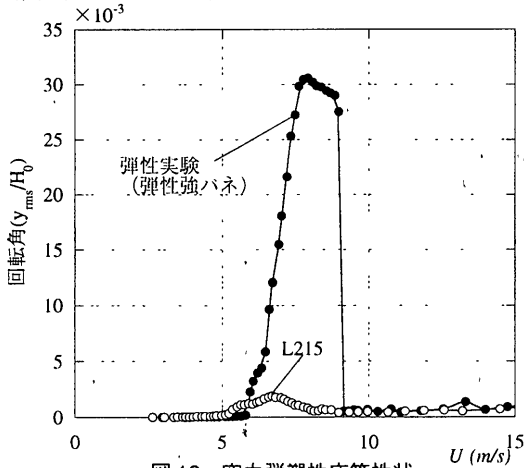


図12 空力弾塑性応答性状

また、渦励振が発生している風速の領域を弾性モデルの場合と比較すると全体的に弾塑性モデルが低風速側にシフトしている。ピークを含めてある程度の大きい振幅時のシフトについては固有振動数のシフトが原因と考えられる。一方、初期剛性が一致しているのに発振風速がシフトしているが、図9に於いてさらに低振幅時に於いても振動周波数の差が消えていない傾向が見られその差によるものと考えられる。ただし、低風速側へのシフトがその周波数の差に相当する分と必ずしも一致しておらず、履歴型ダンパーの塑性化による渦励振の低風速へのシフトについては、より詳細な検討が必要であろう。

7.2 履歴型ダンパーの耐風疲労問題に関連する応答特性

両モデルの実験結果から履歴型ダンパーの疲労問題を評価するとき重要となる応答振幅の安定度及び塑性率について示す。

図13に弾性実験・弾塑性実験におけるピークファクター（応答振幅の最大値 / 応答振幅の標準偏差）<sup>11)</sup>の風速に対する変化を示す。弾性実験では、渦励振領域における振動波形が正弦波に近く、ピークファクターは、ほぼ $\sqrt{2}$ になる。一方、弾塑性実験では渦励振が発生する風速近傍に於いて、ピークファクターは最小値を示し、一旦、弾性実験に於ける渦励振時の値に接近するが、応答レベルが大きくなるそれ

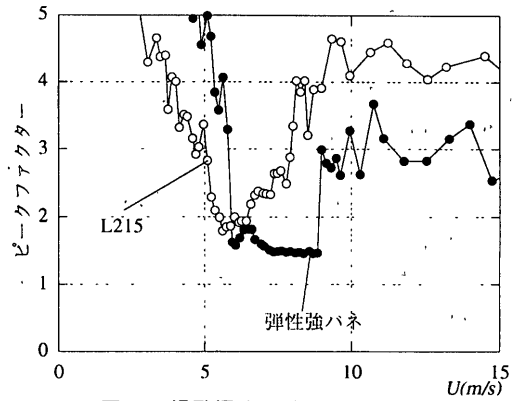


図13 渦励振時のピークファクター

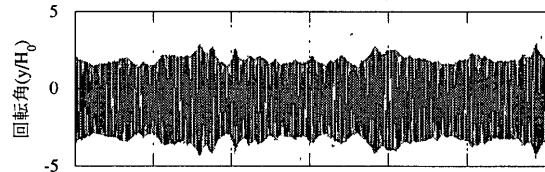
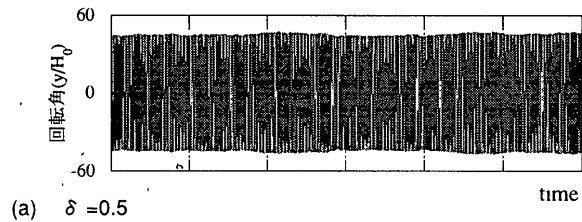


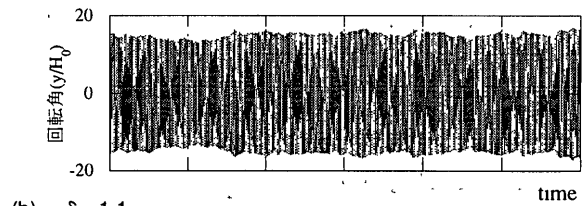
図14 最大応答時の応答波形 (L215)

以上の風速の渦励振領域では2.0以上で推移し、不安定な応答振幅性状を示している (図14)。

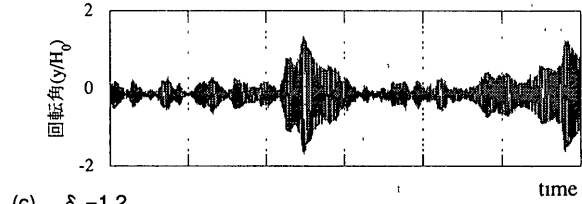
また、今回の実験で用いたダンパーは、変形モード及び用いた鋼材の素材、断面形状などを理由として、低い回転角から緩やかに塑性化が始まっており (図9参照)、回転角-荷重関係を見ても明確な降伏点は現れていないが、General Yield法<sup>12)</sup>を用いて求めた降伏点による塑



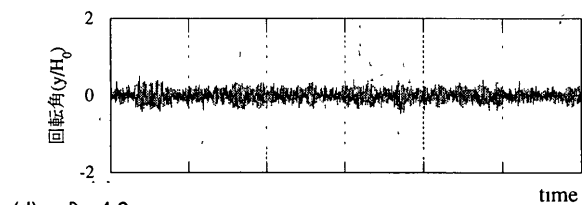
(a)  $\delta = 0.5$



(b)  $\delta = 1.1$



(c)  $\delta = 1.2$



(d)  $\delta = 4.0$

図15 減衰レベルによる応答振幅性状の変化 (弾性実験)

性率は1.3と低い値を示し、塑性化がそれほど進行していないことがわかる。

応答振幅が安定しないこと、及び塑性化が進行しない原因を明らかにするために、比較的高い粘性減衰を付加した弾性実験結果と比較する。各減衰レベルに於ける渦励振時に最大応答を示す風速での波形例を図15に示す。 $\delta \leq 1.0$ では安定した応答振幅性状(図15a)を示すが、 $\delta = 1.0 \sim 1.5$ では応答レベルの低下により強制振動成分の影響を受けて振幅性状が不安定(図15b,c)となり、さらに $1.5 \leq \delta$ では渦励振が生じない(図15d)。 $\delta = 1.0 \sim 1.5$ の領域は、低い応答レベルを原因として渦励振発生の有無に関する遷移領域である。図10に於いて渦励振時最大応答回転角に着目すると $\delta = 1.1$ では $10 \times 10^{-3}$ を示し、これより $\delta$ が大きい弾性実験では渦励振は形成されない。それに対し、L215では標準偏差で評価すると $2 \times 10^{-3}$ になる。履歴減衰の振幅依存性により応答が増大すると、 $\delta_{eff}$ が増加して1.1を越えるために渦励振が抑制され、応答が抑制されると $\delta_{eff}$ が低下し再び渦励振が発振する事を繰り返す、弾塑性振動特有の応答特性を示す。このことにより不安定な応答振幅性状を示し、低い塑性率を示すものと考える。

8. 弾性モデル(弾性弱バネ)に数種の履歴型ダンパーを付加したときの応答特性の変化

前章で示したように弾性モデルに比べ、弾塑性モデルは顕著に応答が抑制されている。次にL215よりも高い応答レベルで降伏する数種のダンパーを用いた実験を行った。これらの実験では弾性弱バネに材長のみを変えたダンパー(表1参照)を配し、 $\delta_s$ は0.5とした。図16に各弾塑性実験(表1参照)の応答性状を示す。材長が短いダンパーほど応答が抑制されている。これは図17に示す自由振動試験から得られた $\delta_{eff}$ と回転角の関係で、材長が短いダンパーほど低い回転角から減衰レベルが上がっている事に対応している。また、材長が短いダンパー程、初期剛性が大きいいため渦励振領域が全体的に高風速側にシフトしている。

図18に空力振動実験時に示した最大応答レベルまで加力した静的加

表1 ダンパー名、弾塑性実験名一覧

ダンパーの材長	ダンパー名	弾塑性実験名	$\delta_s$
21.5mm	D215	L215	0.5
30.0mm	D300	L300	
40.0mm	D400	L400	
50.0mm	D500	L500	

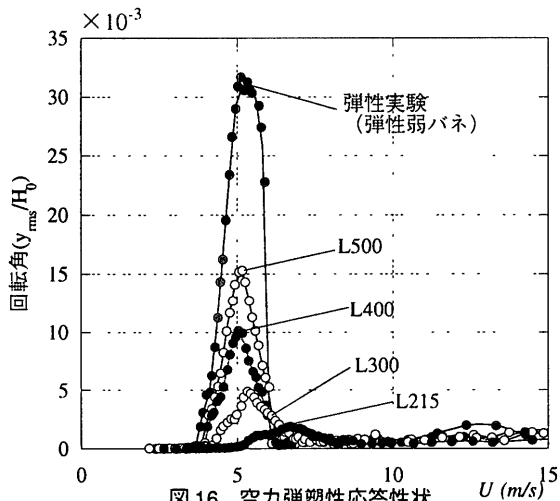


図16 空力弾塑性応答性状

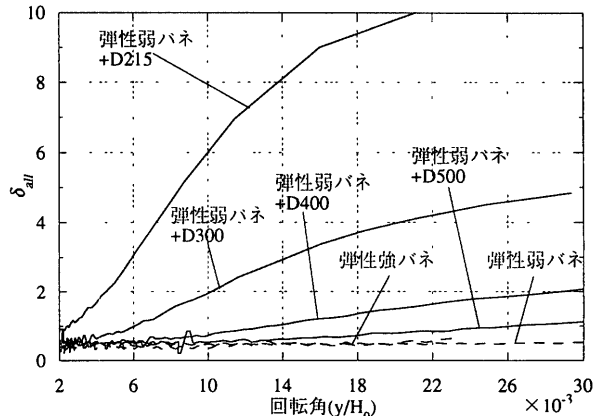


図17 自由振動曲線から求めた回転角と全体質量減衰パラメータ( $\delta_{eff}$ )の関係

力試験によって得た各ダンパーの回転角-荷重関係を示す。いずれの回転角-荷重関係に於いても長周期化による剛性の変化はほとんど見られない。図18中には各弾塑性ダンパーの初期剛性を併せて示している。図19に空力弾塑性応答性状(渦励振発生風速付近を拡大)を示す。各弾塑性実験に於いて渦励振が発生する風速は各ダンパーの初期剛性にほぼ対応している。また、ダンパーの降伏する応答レベルが比較的大きい弾塑性実験(L500, L400)では、弾性実験と同様に渦励振が発生すると急激に応答が増大している。一方、弾塑性実験の中で最も降伏する応答レベルの低いL215では緩やかな応答の増大が見られ

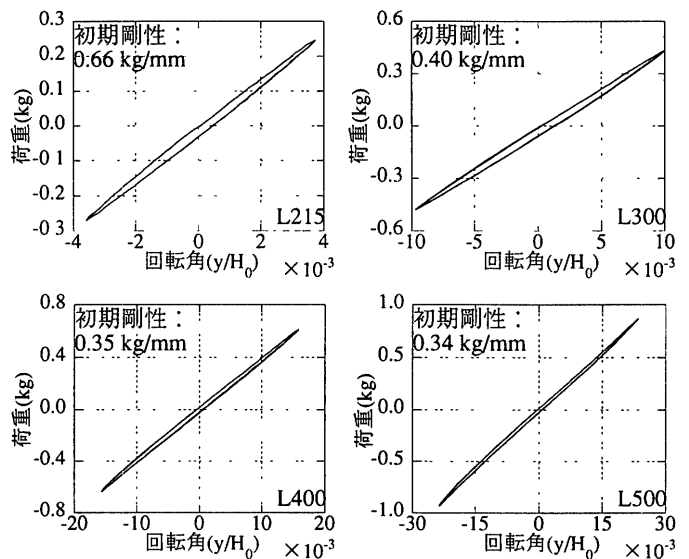


図18 各空力弾塑性実験での最大応答レベルまで加力した静的な回転角-荷重関係

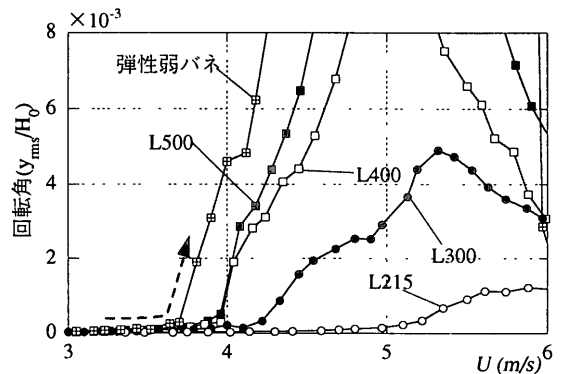


図19 空力弾塑性応答性状(渦励振発生風速付近を拡大)

る。すなわち、ダンパーの降伏する応答レベルによっては弾性振動時同様に風速の増加に対して急激に応答が増大する可能性がある。

弾塑性実験の中で最大応答時に於いて、弾性実験と同じように正弦波に近い応答性状を呈したL500を例に、渦励振最大応答時に於ける応答レベルと減衰レベルの対応を図20より検討する。なお、弾性時と初期剛性が異なることから横軸には無次元風速を用いる。L500については塑性化による固有周期の変化がほとんど生じていないことをふまえ、図中の横軸は風速を実験中支配的となっていた振動数、及び模型の見付け幅で無次元化している。図17の自由振動試験結果より求めた $\delta_{all}$ と回転角の関係からL500の渦励振最大応答レベルでの $\delta$ は0.9と見積もられる。粘性減衰を付加した弾性実験( $\delta=0.9$ )と比較すると渦励振最大応答レベルが一致している。また、L500の実験結果は渦励振が発生し応答が増大する風速、及び渦励振が収まる風速に関して $\delta=0.5$ の弾性実験結果と一致している。すなわち粘性減衰を用いた弾性実験と弾塑性実験で $\delta$ が一致すれば、応答振幅が統計値としてはほぼ対応することを示している。これは弾塑性モデルに於ける履歴減衰の変位依存性により大振幅振動時に高い減衰性能を有するダンパーを配しても低振幅レベルでは減衰性能が低いため、渦励振が完全には抑制されない事を示している。

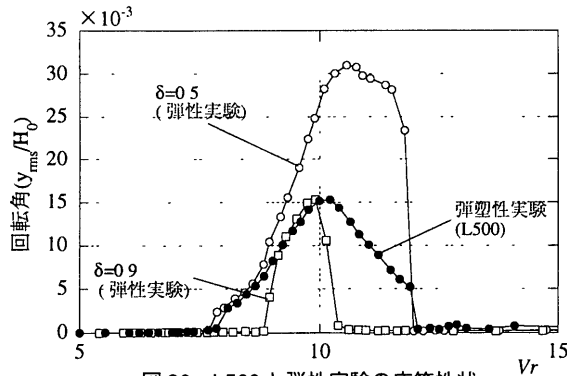


図20 L500と弾性実験の応答性状

## 9. 結論

空力不安定現象が発生する高風速域まで視野に入れて、制振装置として弾塑性ダンパーを設置した高層建築物モデルの応答特性を明らかにする実験装置を製作し、その基本的な弾塑性挙動を整理した。

さらに基本的な平面形状である正方形平面を有する角柱(アスペクト比6)を対象として風洞装置を用いた空力振動実験を行い、一様流下で空力振動時における応答の再現性を確認し、空力不安定振動時における弾塑性ダンパーの塑性化が応答特性に与える影響を明らかにするために初期剛性の等しい弾性モデル(弾性強バネ)及び弾塑性モデル(弾性弱バネ+D215)を用いた空力振動実験結果を比較し、以下の知見を得た(1.~4.)。また、弾性弱バネを用いた弾性実験と、材長を変えたダンパーを用いた弾塑性実験(L215、L300、L400、L500)により応答レベル及び渦励振の生じる風速域に関して以下の定性的な応答性状を確認した(5.、6.)。

- 履歴型ダンパーによる渦励振時の応答抑制を確認した。弾性強バネと初期剛性が等しく、弾性弱バネと弾塑性ダンパーの初期剛性の比が5:6となる弾塑性モデルを用いた場合、応答レベルは弾性実験の8%まで著しく抑制された。
- 弾性モデルと弾塑性モデルを比較すると渦励振領域に関しては弾塑性モデルの方が低風速側にシフトする例が見られた。ただし、その

シフト分と塑性化との対応については検討の余地が残されている。

- 履歴型ダンパーの疲労問題を評価する上で重要となる、渦励振時の応答振幅の安定性及び塑性率を示した。弾性実験では振幅性状が安定して正弦波に近い形状となり、ピークファクターは $\sqrt{2}$ 近辺を示す。それに対し弾塑性実験では、不安定な振幅性状を呈し、ピークファクターは2.0以上の値となる。また、塑性率は1.3と低い値を示し、塑性化による固有周期の長周期化は大きくなかった。これらは、履歴減衰により振動系の減衰性能が上昇し、応答が低下した結果、カルマン型渦励振が形成されなくなるためと考える。
- 振動系に対して履歴減衰を付加したとき、大変形時に高い減衰性能を有するダンパーを設置した場合においても、渦励振は完全には消失しない。履歴減衰の変位依存性により、低い応答レベルでは振動系の減衰性能が低下するためである。
- ダンパーは材長が短いほど、降伏する応答レベルが低く渦励振がより抑制される。また、このとき初期剛性が大きいため、渦励振領域は高風速側にシフトする。渦励振の発生風速は各弾塑性実験で用いた弾塑性ダンパーの初期剛性にほぼ比例している。
- L215では風速の増加と共に、弾性実験に比べて緩やかに応答が増大している。一方、ダンパーの降伏する応答レベルが高い弾塑性実験(L500、L400)では、風速の増加に伴い弾性実験と同様に急激な応答の増大を示した。すなわち高層建築物に弾塑性ダンパーを設置した場合でも、ダンパーの降伏する応答レベルによっては弾性実験同様に応答が急激に増大する可能性があることを示している。

## 参考文献

- 岩田 衛、黄 一華、川合廣樹、和田 章：被害レベル制御設計法「Damage Tolerant Structure」に関する研究、日本建築学会技術報告集、第1号、pp 82 ~ 87、1995 12
- 日本建築学会：動的外乱に対する設計 - 現状と展望 -、1999
- 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 その1 風直角方向振動の場合、日本建築学会構造系論文集、第481号、pp 9 ~ 16、1996 3
- 大熊武司、伊藤純子：振動依存風力を考慮した時刻歴応答解析による矩形断面弾塑性構造物の風応答性状、第15回風工学シンポジウム論文集、pp 479 ~ 484、1998 12
- 早川 輝：弾塑性構造物の風応答性状に関する数値解析的研究、東京工業大学修士論文、1996
- T Tamura, R Okada and A Wada: Hysteretic damping performance for vortex-induced oscillation of tall building, Proceedings of the 10th international conference on wind engineering, Vol 1, pp591-598, 1999 6
- 和田 章、岩田 衛、清水敬三、阿部重孝、川合廣樹：建築物の損傷制御設計、丸善株式会社、1998 9
- 日本建築センター：実務者のための建築物風洞実験ガイドブック、日本建築センター出版部、1994 5
- 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説、日本建築学会、1993
- 大野輝久：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
- 大熊武司、神田順、田村幸雄：建築物の耐風設計、鹿島出版会、1996 3
- 秋山 宏、山田 哲、松本由香、田中宏志、三山剛史、寺田岳彦：冷間成形角柱鋼管柱の実大振動台実験、日本建築学会構造系論文集、第521号、pp.133 ~ 140、1999 7

(2000年3月9日原稿受理、2000年7月5日採用決定)