

中低層免震建物の風洞実験模型の開発

安井八紀^{*1}, 大熊武司^{*2}, 丸川比佐夫^{*1}, 軽部英生^{*3}, 下村祥一^{*2}

(*1: 泉創建エンジニアリング, *2: 神奈川大学工学部建築学科, *3: 神奈川大学工学研究科)

1. 序

兵庫県南部地震を契機に、大地震時における建築物の安全性や機能保持に対する要求が高まっている。構造耐力上の安全性のみならず、建物内に設置される機器・設備などの移動や転倒等が少なく、地震後の機能回復が容易であることから、急激に免震建物が普及している。また、従来上部構造として中低層RC造建物に主として適用されてきた免震構造は、軽量の住宅などの小規模なものから、高さ60mを超える超高層建物への適用例も見られるようになってきており、益々、多様化への傾向にあるといえる。

しかし、強風時の免震建物に関する研究¹⁾²⁾³⁾によれば、必ずしも免震建物が風外乱に対して有益であるとは言い難い。また、従来、地震応答評価に用いられてきた免震部材の復元力モデルは、強風時の応答を評価するモデルとして必ずしも適切ではないことが指摘されてきている⁴⁾⁵⁾⁶⁾。

建築物の風応答を予測する方法として、第1に風洞実験によって得られる風外乱の情報に基づき、解析的に推定する方法、第2に構造物の振動特性と相似な模型を風洞内に設置し、直接的に応答を予測する方法、第3に両者を混合した方法が挙げられる。

第1の方法に基づく研究は、小規模な住宅から超高層建物までを対象として、弾塑性挙動を考慮した研究⁷⁾⁸⁾、振動依存風力を考慮した研究⁹⁾など、多くの実績が挙げられ、現在も盛んに研究が進められている。

第2の方法に基づく研究としては、丸川ら¹⁰⁾や田村ら¹¹⁾の研究が挙げられる。丸川らは、質点毎に水平2自由度と振れを考慮した多質点弾性模型を開発し、ロッキング模型による応答との比較、ならびに振動依存風力による応答について議論している。この弾性模型は、弾性域に限ったものではあるが、質点毎に3自由度有するため、振動依存風力などの複雑な外乱に対しても適用できることに特長がある。田村らは、ロッキング模型に弾塑性ダンパーを組み入れ、ダンパーを有する高層建築物の風直角方向応答について検討している。この弾塑性模型は、系全体として1自由度のみしか有さないため、実現象をどの程度再現しているかは不明ではあるが、弾塑性挙動を取り扱った風洞実験としては先駆的である。

第3の方法に基づく研究としては、神田¹²⁾らの研究が挙げられる。神田らは、剛体模型基部に設置した動的天秤の情報を基に、逐次応答を解析し、その結果を模型の変位としてフィードバックする方法を用いている。この手法の場合には、動的天秤からの風力情報に慣性力が含まれるなど、種々の問題が残されているのが実状である。

振動模型を用いた研究は、風速に対して応答が極度に非線形性を示す領域の性状をより精度良く把握しようと試みた研究である。

本研究は、免震建物の超周期化、多様化、さらに風応答に関する研究の現状を踏まえ、丸川らの研究アプローチを参考にして、まず第一歩として、中低層免震建物を対象とした多質点弾塑性模型の開発を行うものである。

2. 対象建物概要

実験対象建物は、文献1)～3)、6)および13)～15)に示されるように、振動実験、風洞実験に基づく応答予測が行われている神奈川大学23号館である。

神奈川県立23号館は、図1に示すように地上8階建て塔屋2階、地下2階で、免震層は地下2階と地下1階の間に設けられている。軒高は約30m、最高部高さは約39mで、その平面形状は南北方向に約90m、東西方向に約32mと、南北に長いL字型の形状をしている。

設計図書¹⁰⁾によれば、上部および下部構造の耐震クライテリアは、レベル2地震動に対して共に許容応力度内に留まることとしており、再現期間100年の風荷重に対しては、ダンパーが降伏しない設計としている。因みに、この風荷重の約1.4倍で鉛ダンパーが降伏する。

また、設計図書の解析結果によれば、長辺方向(南北軸)をX方向、短辺方向(東西軸)をY方向とすると、免震層を固定した場合の1次固有振動数はX, Y, Θ 方向で1.18Hz, 1.14Hz, 1.28Hzで、免震層の初期剛性を考慮した1次固有振動数はそれぞれ0.72Hz, 0.70Hz, 0.74Hzである。いずれの場合も短辺方向であるY方向の固有振動数が最も低く、捩れの固有振動数が最も高いが、その振動数比は約1.1と小さい。因みに、設計図書の重量および剛性を用い、上部構造を剛体として免震層の初期剛性を評価した場合の固有振動数は1.38Hzとなる。また、建物の重心と免震層の剛心とのずれは、X方向で0.1m以下、Y方向で約0.5mであり、殆ど偏心のない構造となっている。

3. 実験模型の設計と製作

3.1 実験模型の縮尺と実験風速

実験模型の縮尺は、風洞の閉塞率、気流の相似則、および、後述する模型においての免震部材の降伏変形を考慮して1/200とした。設計風速に対応する実験風速を5m/sに設定した。この場合の実建物と実験模型の特性は、表1に示すような関係となる。

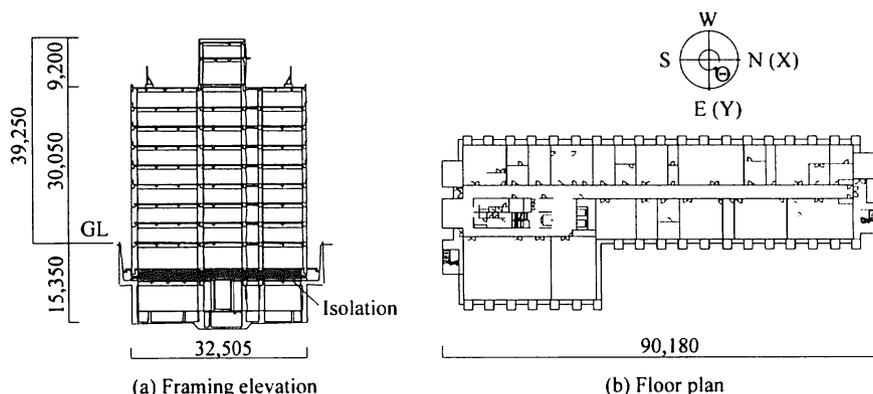


図1 対象建物概要

実験模型は、実建物の地下1階と8階に相当する高さに質量を配分した2質点のせん断モデルとし、各質点毎に並進2自由度と捩れ1自由度を持たせた。上部構造の剛性は、丸川ら¹⁰⁾の研究と同様に、そのせん断剛性に等価な4本の鋼製の柱にモデル化し、捩れ剛性が実建物と相似になるように配置した。実験模型の概要を図2に示す。

3.2 模型用免震部材の開発

対象建物には免震部材として、天然ゴム系積層ゴムアイソレーター、鉛ダンパーおよび鋼棒ダンパーが採用されている。本研究で開発したこれらの免震部材に対応する実験用の部材の開発方法を以下に示す。なお、実建物においての免震層の終局限界変形は420mmであるが、本実験模型では1mmを想定した。

3.2.1 積層ゴムアイソレーターの実験用モデル

対象建物で採用している積層ゴムアイソレーターは、レベル2地震動においても弾性的な挙動を示す免震部材である。この弾性剛性を実験模型に反映する方法としては、前述した上部構造と同様に、鋼製の柱により実現する方法が

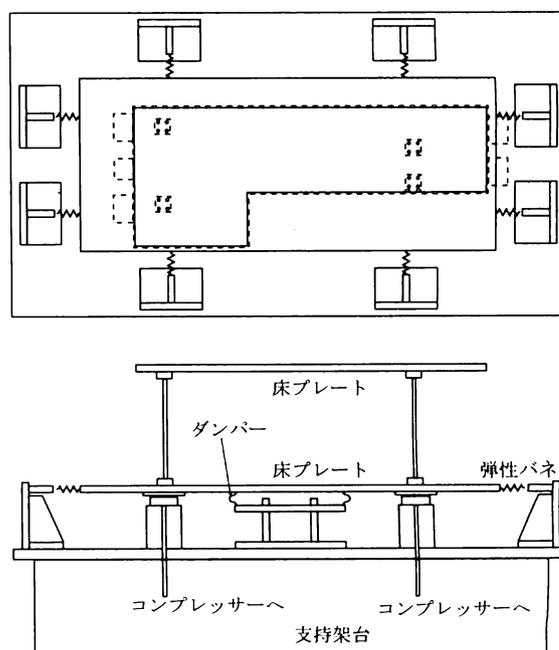


図2 実験模型の概要

表1 実建物と実験模型の特性

項目	記号		実建物	模型	
地上から最高部までの高さ (m)	H_f	$H_m = H_f \lambda_L^{(注)}$	39.3	0.197	
幅 (m)	B_f	$B_m = B_f \lambda_L$	91.0	0.455	
			32.0	0.160	
奥行 (m)	D_f	$D_m = D_f \lambda_L$	33.0	0.165	
			20.5	0.103	
総重量 (N)	W_f	W_m	291,000,000	36.4	
設計風速 (m/s)	U_{Hf}	U_{Hm}	39.7	5.0	
上部構造の剛性 (N/mm)	k_f	k_m	235,000	184	
免震部材の剛性 (N/mm)	積層ゴムの剛性	$R K_f$	$R K_m$	90,000	72
	鉛ダンパーの初期剛性	$L K_f$	$L K_m$	564,000	453
	鋼棒ダンパーの初期剛性	$S K_{f1}$	$S K_{m1}$	157,000	126
	鋼棒ダンパーの2次剛性	$S K_{f2}$	$S K_{m2}$	4,900	4
免震層の剛性 (N/mm)	初期剛性時	K_{f1}	K_{m1}	811,000	652
	鉛ダンパー降伏後	K_{f2}	K_{m2}	247,000	199
	鋼棒ダンパー降伏後	K_{f3}	K_{m3}	95,000	75
固有振動数 (Hz)	免震層固定時	n_{fx0}	n_{mx0}	1.18	29.7
	初期剛性時	n_{fx1}	n_{mx1}	0.72	18.1
	鉛ダンパー降伏後	n_{fx2}	n_{mx2}	0.45	11.3
	鋼棒ダンパー降伏後	n_{fx3}	n_{mx3}	0.284	7.1
	積層ゴムのみを考慮	n_{fx}'	n_{mx}'	0.276	7.0
降伏せん断力 (N)	鉛ダンパー	$L Q_{yf}$	$L Q_{ym}$	470,000	1.89
	鋼棒ダンパー	$S Q_{yf}$	$S Q_{ym}$	510,000	2.05
降伏変形 (mm)	鉛ダンパー降伏時	Δ_{f1}	$\Delta_{m1} = \Delta_{f1} \lambda_L$	0.83	0.04
	鋼棒ダンパー降伏時	Δ_{f2}	$\Delta_{m2} = \Delta_{f2} \lambda_L$	3.25	0.16
降伏層せん断力 (N)	鉛ダンパー降伏時	Q_{f1}	Q_{m1}	676,000	2.12
	鋼棒ダンパー降伏時	Q_{f2}	Q_{m2}	1,270,000	5.11

注) λ_L :長さの縮尺で、この場合 1/200

挙げられる。この場合、実験において想定する免震層の変形を1mmとすると、柱の長さは200mm以上必要となる。また、実建物の全アイソレーターの水平剛性と相似となる剛性を4本の鋼製柱でモデル化すると、その断面は柱の長さを200mmとした場合で直径3mm程度の円形断面となり、非常に細長く、加工の精度、その取扱いが難しい。そこで、本研究では、鉛直方向支持力と水平剛性を個別に担うモデルを取り入れることとした。

まず、鉛直方向支持材としてベアリングで、水平剛性をコイルバネでモデル化することとして、模型を試作した。試作の結果、ベアリングの摩擦力が思いのほか大きく、かつ動作性が滑らかではないことが明らかになり、この方法は不採用とした。本研究で、最終的に採用したモデルは以下のようなものである。

アイソレーターの水平剛性に相当する弾性バネは、各方向について4本の引張コイルバネでモデル化する。振れ剛性が、実建物と相似になるようにコイルバネを配置する。鉛直力については、エアーコンプレッサーによって供給される空気圧によって支持し、支持架台と絶縁する。この場合、表1に示す模型の積層ゴムと等価な剛性を持ち、1mmの変形に追随するものは、容易に既成のコイルバネから選択できる。本研究では、KS産業D-Seriesの引張コイルバネを採用した。

なお、アイソレーターのモデルによる振れ剛性を実建物と相似にする際には、設計図書¹⁶⁾に記載されている積層ゴムアイソレーターの剛性および配置を考慮し、アイソレーターのみの剛性を評価した擬似立体モデルによる固有値解析⁶⁾を実施し、その結果に基づいて、実験用部材モデルの配置を決定した。

3.2.2 ダンパーの実験用モデル

(1) 材料および形状決定のための試算

ダンパーの実験用モデルは表1に示すように、鉛ダンパーで0.04mm、鋼棒ダンパーで0.16mmの変形で降伏荷重に達しなければならない。また、振れ剛性の調整を可能にするためには、4本以上の部材によってモデル化する必要がある。この場合、ダンパーの断面形状を円形、断面に直交する方向の形状を直線とし、端部の全塑性モーメントをもって降伏荷重に達するものとする、SS400相当の素線を用いた場合、鉛ダンパーで直径1mm長さ27mm、鋼棒ダンパーで直径0.4mm長さ6mmと試算される。この試算結果から、本研究ではダンパーの設計製作において、以下のような項目を配慮した。

- 1) 試算結果が示すダンパーの長さから、1mmの変形を想定した場合に、幾何学的な非線形性が無視できないことが容易に理解され、断面に直交する方向の形状を直線とすることはできない。したがって、少なくとも1方向には湾曲した形状とする。
- 2) 素材を湾曲させるための曲げ加工の際に、折れ曲がることのないような延性材料を用いる。
- 3) 曲げ加工の際に歪硬化が生じるような材料については、焼きなましなどの方法により容易に除去できるような材料を用いる。
- 4) ダンパーを精度良く、再現性をもって製作すること可能にするための製作治具も考慮しつつ、その形状を定める。

これらを配慮して、鉛ダンパーのモデルには鉛を、鋼棒ダンパーのモデルにはアルミニウムを採用し、その直径をそれぞれ0.65mm、0.5mmとした。この直径は、先の示した鋼製の素線による試算と同様な方法で求めた。以降、鉛ダンパーのモデルを模型用鉛ダンパー、鋼棒ダンパーのモデルを模型用鋼棒ダンパーと呼ぶ。

(2) ダンパーの形状決定のための解析

ダンパーの形状を決定するに当たり、有限要素法によるケーススタディを行った。形状は、図3に示すようなステンレス製の固定ピンと押し出しピンによって形成される形状を想定し、ピンの直径を模型用鉛ダンパーには1mm、模型用鋼棒ダンパーには1.5mmとした。ケーススタディにおけるパラメータは、図3の下段に示すSおよびLであり、これらパラメータを適切に評価することで、ダンパーの弾性剛性および降伏荷重(または、降伏変位)を実建物と相似にすることを試みた。ただし、2次剛性の相似性については考慮しないこととした。解析コードMAC.MARC2000を使用した。

まず、パラメータの範囲を絞り込むため、ダンパーを40要素の3次元弾性はり要素にモデル化し、解析を行った。境界条件は、一端を固定、もう一端をO方向あるいはP方向に単位変形を与えることとした。得られた反力から弾性剛性と、端部が全塑性モーメントに達する変位を求めた。解析に用いた素材の材料定数を表2に示す。

続いて、この結果に基づいて、幾何学的非線形および材料非線形を考慮して、想定ひずみ法を適用した8節点ソリッド要素による解析を行い、パラメータSおよびLを決定した。解析では、一端を固定し、もう一端を変位

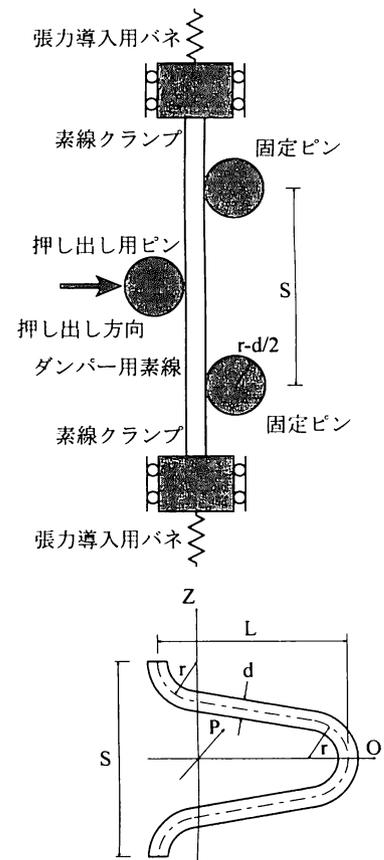


図3 ダンパー加工の概念とダンパーの形状

表2 解析に用いた素材の材料定数⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾

	鉛	アルミニウム
ヤング率 (N/mm ²)	1.61x10 ⁴	6.83x10 ⁴
ポアソン比	0.44	0.34
降伏応力度 (N/mm ²)	32	100

制御により荷重を与える方法を用いた。降伏関数としてはVon Misesの降伏条件を仮定し、完全弾塑性とした。なお、想定ひずみ法は、要素内の曲げ特性を向上させるための手法である。図4に解析結果の事例として模型用鉛ダンパーの相当応力度分布を示す。図中においては、黒色の部分が塑性域に達した領域である。

以上のケーススタディの結果、模型用鉛ダンパーの場合には $S=4\text{mm}$ 、 $L=3\text{mm}$ 、模型用鋼棒ダンパーについては $S=7\text{mm}$ 、 $L=3\text{mm}$ と決定した。

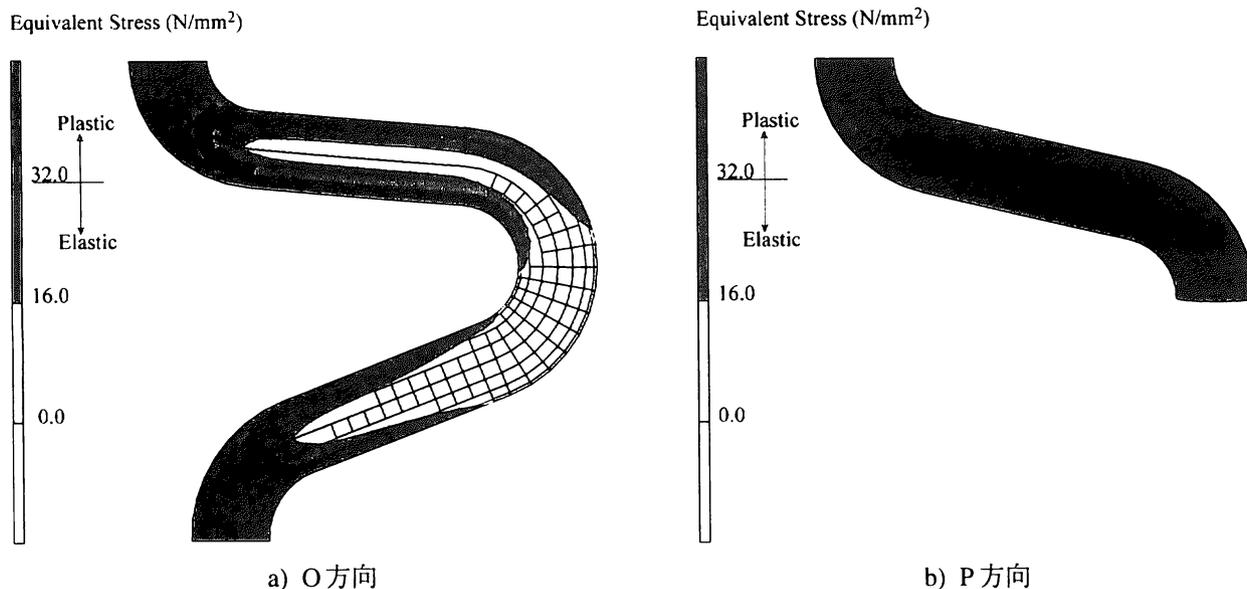


図4 有限要素法による解析事例（鉛ダンパー， $S=7\text{mm}$ 、 $L=3\text{mm}$ ）

(3) ダンパーの加工方法と模型への組み込み方法

ダンパーを、精度良く、再現性をもって製作するために、図3に示すステンレス製の固定ピンと押し出しピンを組み込んだ治具を製作し、曲げ加工はこの治具によった。しかし、ダンパーの形状が小さく、細いため、模型内での取り付け方向および端部の固定条件を満足させるためには、端部の固定方法を工夫する必要がある。そこで、本実験モデルでは、両端部を1.5mm角（板厚0.25mm）の真鍮パイプ内に10mm程度挿入し、硬質に凝固するパテによって固定することとした。

また、文献19)によると、一般に素線として入手可能なアルミニウムは冷間圧延されているため、表2に示す降伏応力度の2～3倍程度の降伏応力度を示し、伸びも10%を下回る。そこで、本研究では、曲げ加工の前後に、一定の温度を保つことのできる電気炉（クマザキエム）の中に1時間放置することで焼きなましを行い、その後、前述の端部固定処理を行うこととした。焼きなましの温度は、この焼きなまし処理と後述の材料試験との試行錯誤の結果、250℃とした。炉内温度は、アンリツ社製の熱電対（I-K-J1M1-1000）により確認した。

(4) ダンパーの特性試験

ダンパーの特性を把握するため、載荷試験装置を製作した。試験装置は、せん断変形に対応する定格容量5.88N(MINEBEA, CB17-600G-11)のロードセルを組み込んだもので、変位制御により載荷することができる。変位は、ロードセル支持部を貫通するシャフトが軸回りに1回転することで、1mmの水平変位を与えることができる。変位の測定は、装置に固定されるレーザー変位計（キーエンス, LB-080）によって行っている。模型用に製作したダンパーの定振幅繰り返し載荷試験の結果を図5に示す。なお、同図には、O方向およびP方向の載荷実験結果に加え、前述した有限要素法による解析結果も併せて示している。

両模型用ダンパー共に、一定の変位振幅に対し、一定の荷重振幅値を示している。

降伏荷重および降伏変位の目標値に対して実験値は、模型用鉛ダンパーのO方向を除いて、概ね良好な対応

が認められる。また、P方向においては、解析値は実験値に対し、弾性勾配および降伏後の変位ともによく対応している。

一方、両ダンパー共に、载荷方向の違いによる特性の差が、解析および実験値に若干認められる。この载荷方向による相違は、直交させた2本を1組として模型に取り付けることで緩和できる。

以上の結果から、若干の試行錯誤は必要であるが、前述した方法により、実建物に用いられる鉛ダンパーおよび鋼棒ダンパーに相似な模型用のダンパーを製作することができることを、ダンパー単体については確認した。

なお、各ダンパーのモデルによる振れ剛性を実建物と相似にする際には、設計図書⁶⁾に記載されている各ダンパーの剛性および配置を考慮し、それぞれのダンパーのみの剛性を評価した擬似立体モデルによる固有値解析⁶⁾を実施し、その結果に基づいてモデルの配置を決定することで実現できる。

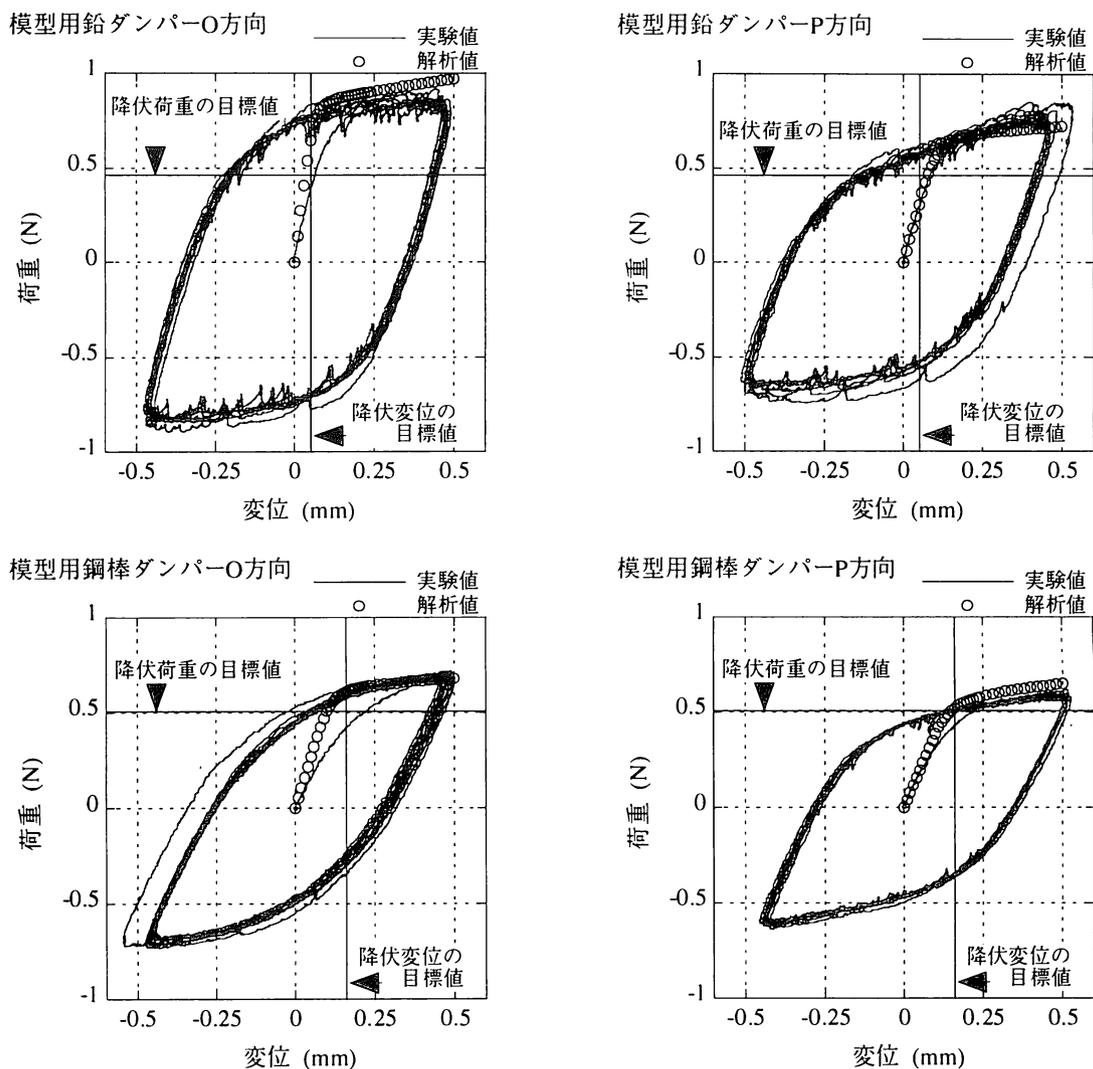


図5 模型用ダンパーの载荷試験結果と解析結果

4. 実験模型の基本性能

風洞実験に先立ち、模型の基本特性を確認するため、異なる初期変位を与えた自由振動実験を行った。自由振動波形ならびに波形から求めた振動モードを図6に示す。

免震層の初期変位が0.03mmの場合は、模型用ダンパーは弾性状態(図5参照)にあり、設計で言うところの初期剛性時に相当する。この自由振動波形から求められる固有振動数は18.5Hzで、目標とした固有振動数18.1Hz(表1参照)と良く一致している。半周期毎の対数減衰率によって求めた減衰定数は、半周期目では8%、それ以降は1%前後の値であった。

免震層の初期変位が0.20mmの場合は、模型用の鉛ダンパーおよび鋼棒ダンパー共に降伏変位を超えた状態(図5参照)に相当する。この自由振動波形から求められる固有振動数は16.4Hzで、振幅が大きくなることに伴って、固有振動数が低くなっていることがわかる。半周期毎の対数減衰率によって求めた減衰定数は、半周期目では14%、1周期目で6%、それ以降は2%前後の値であった。

各層の自由振動波形から求めた固有振動モードは、概ね初期剛性時の振動モードに一致している。

図6の変位の自由振動波形から微分して得られる加速度時系列に各層の質量を乗じ、それらを合算して求めた免震層の層せん断力と変位の関係を図7に示す。目標の復元力特性に概ね一致していることがわかる。

以上の結果から、実建物に用いられる免震層に相似な模型用の免震層を製作することができたことを確認した。

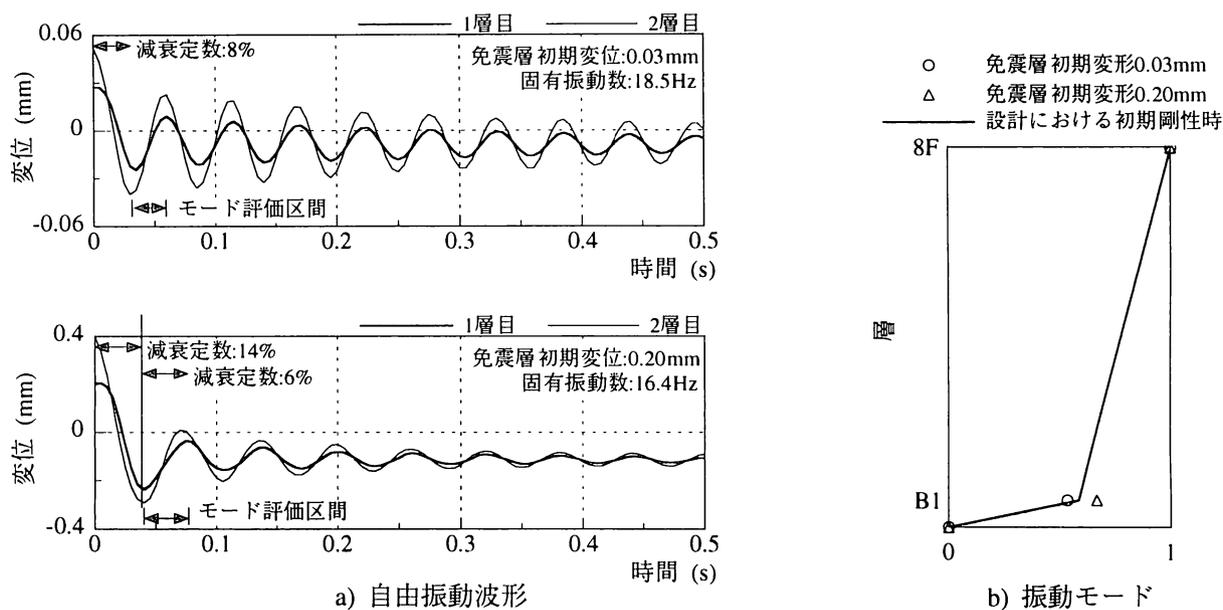


図6 自由振動波形と振動モード

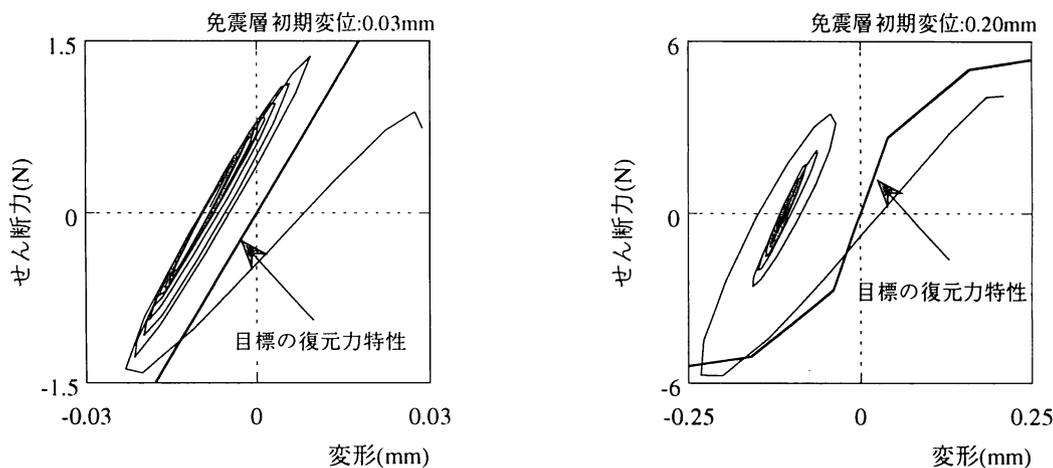


図7 自由振動時の復元力特性

5. 風応答実験

5.1 実験条件

実験風向は図1のE方向を対象とした。気流は、粗度IVの乱流境界層流とし、周辺部は再現していない。実験は、風速を模型頂部で平均風速3.5m/sから13.5m/sの間を16段階に変化させ、レーザー変位計(キーエンス, LK-030, LB-080, LK-500)により各風速において60秒間、サンプリング周波数200Hzで応答変位を測定した。測定位置は1層および2層共に、風方向については図2に示す柱取り付け位置に相当する2点、風直角方向については剛心位置に相当する位置である。

5.2 応答変位の時系列とパワースペクトル密度

模型頂部の平均風速が3.5m/s、8.5m/sおよび13.5m/sの時の2層の応答変位の時刻歴波形を図8に、パワースペクトル密度を図9に示す。両図の風方向並進変位は、2点の風方向の変位を平均して求めたものであり、揺れによる変位は2点の差をとったものである。また、頂部平均風速3.5m/s、はダンパーは弾性挙動を示す風速に、同8.5m/sは模型用鉛ダンパーが平均風速によって塑性域に概ね達する程度の風速に、同13.5m/sは模型用

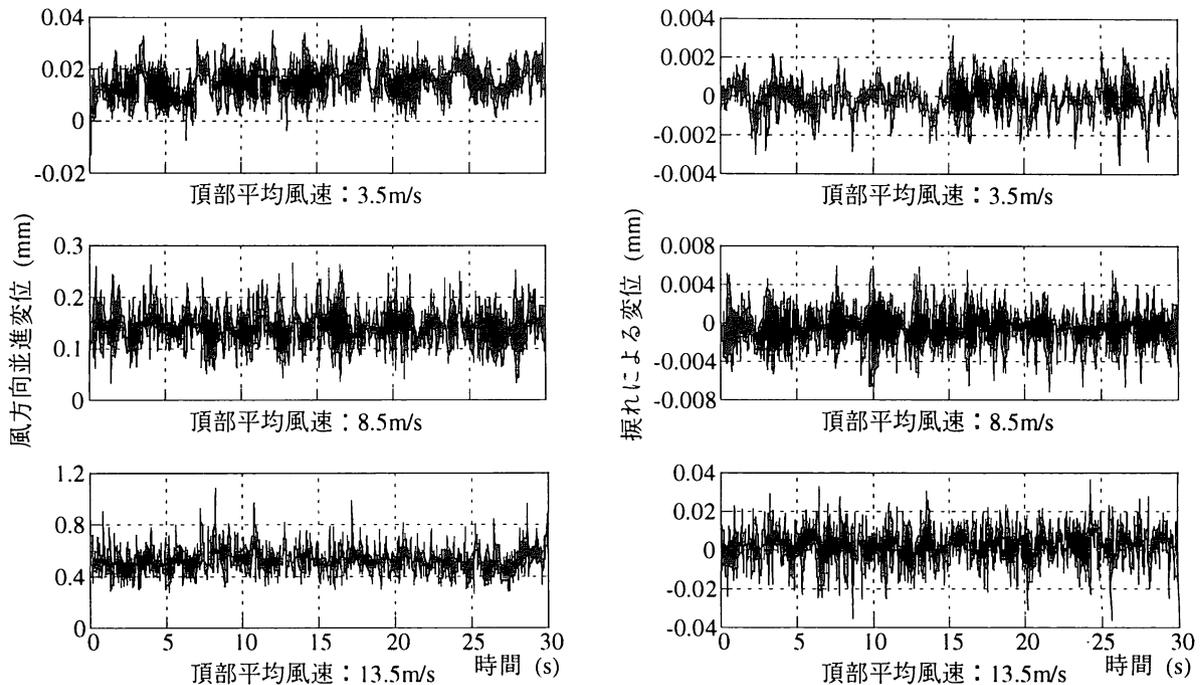


図8 応答変位の時刻歴波形の事例

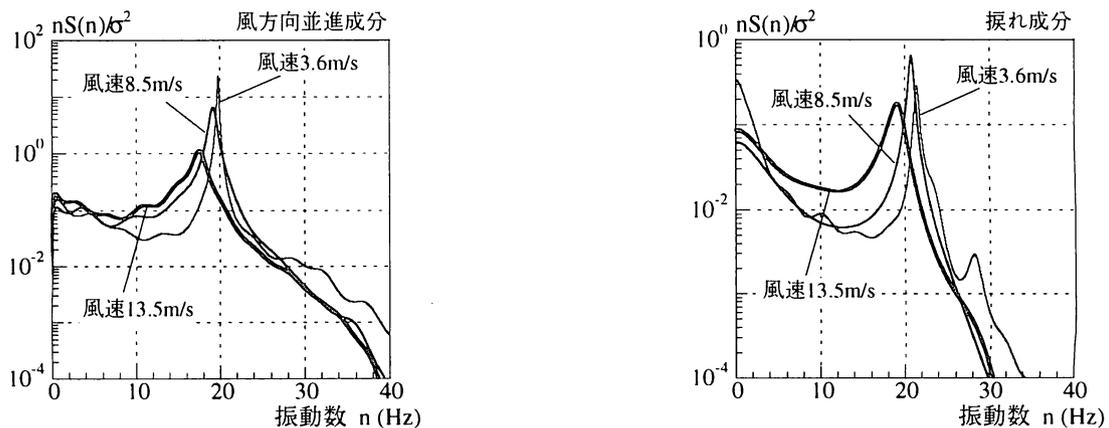


図9 応答変位のパワースペクトル密度

鋼棒ダンパーも完全に塑性域に達している風速に相当する。

並進成分の時系列においては、風速の増加に伴って、高振動数成分が相対的に減少している。また、同成分のパワースペクトル密度においては、スペクトルのピークが低振動数側に移動して、風速の増加に伴ってスペクトルピークの鋭さも鈍くなっている。

一方、振れによる変位成分の時系列では、頂部平均風速8.5m/sにおいて高振動数成分の占める割合が最も高く、スペクトルピークが最も鋭い。これは、頂部平均風速が8.5m/sの場合には、模型用鉛ダンパーが平均風速で塑性域に達する程度の風速であるため、僅かな振れ変形であっても個々のダンパーに塑性化の程度が差が生じ、振れ振動が生じやすくなっているためと考えられる。当然、この現象は、実建物においても生じる可能性がある現象である。

5.3 風速と応答変位の関係

図10に、模型頂部の平均風速と応答変位の統計量の関係を示す。

応答変位の平均値、標準偏差および最大値は平均風速に対して、両対数軸上で概ね直線的な増減関係を示している。ただし、その勾配は若干異なる。

変位のピークファクターおよびガスト影響係数には以下のような傾向が認められる。応答変位のピークファクターは、平均風速に関係なく5前後の値を示している。一方、ガスト影響係数は、風速の増加に伴って低下する傾向が認められる。

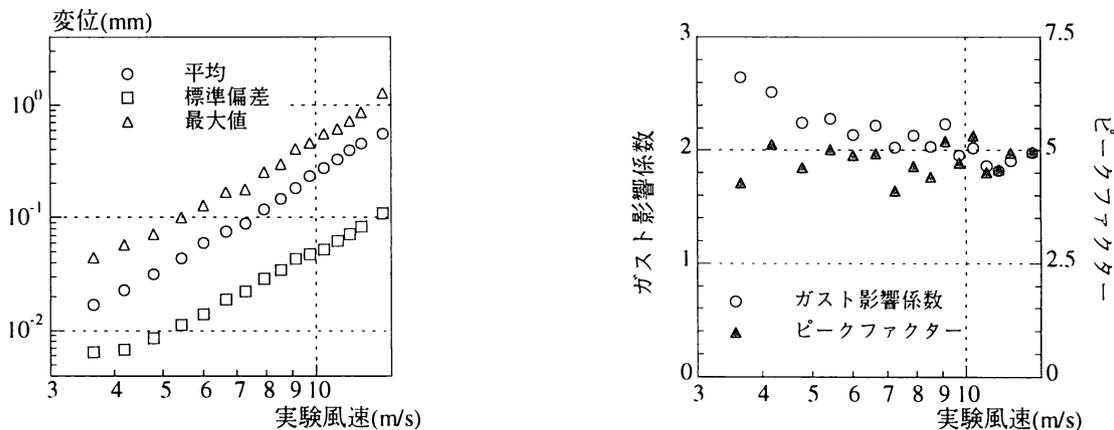


図10 風速と応答変位の関係

6. まとめ

神奈川大学23号館を事例に、免震層の復元力特性を取り入れた風洞実験模型を開発した。その結果以下のような知見を得た。

- 1) 鉛およびアルミニウム素線を用いて、鉛ダンパーおよび鋼棒ダンパーの実験用モデル作成し、概ね目標とした特性を有するダンパーを製作することができた。
- 2) 実験用ダンパーの形状を決定するに当たり、有限要素法によるケーススタディが有効であることが確認された。
- 3) アルミニウム素線は、焼きなまし処理により、種々の降伏応力度に設定できることが確認できた。
- 4) これらの実験用模型ダンパーは、中低層建物だけを対象とするものではないため、同縮尺程度の高層建物模型にも比較的容易に適用できるものと考えられる。
- 5) ダンパーには若干の異方性があるが、これを無視すれば低い風速域での応答評価、即ち、居住性の評価も可能であると考えられる。
- 6) 模型内に設置したダンパーが各4本であることにより、各ダンパーの特性が応答に反映され易くなって

いる。特に振れ振動において顕著である。

- 7) 開発したダンパーは、水平面のどの方向に対しても剛性およびダンパーとして働くため、指向性のある制振構造物へ適用するためには、今一つの工夫が必要である。
 - 8) アイソレーターのモデルとして、エアークンプレッサーから供給される空気圧によって模型を鉛直方向に支持し、水平方向の剛性を引っ張りコイルバネで評価する手法を取り入れた。定量的な把握はできていないものの、特に、問題となるような現象は生じなかった。今後、高層建築物に適用する場合には、大きな転倒モーメントが生じるため、この点に関しても定量的な把握が必要であると考えられる。
- 今後、高層免震建物に対して本研究の成果を取り入れ、検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 大熊武司, 伊藤純子, 丸川比佐夫, 岡田創, 下村祥一, 軽部英生 : 神奈川大学23号館(免震棟)の風応答性状に関する研究(その1 風力特性), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.197-198, 2001.9
- 2) 大熊武司, 伊藤純子, 丸川比佐夫, 岡田創, 下村祥一, 軽部英生 : 神奈川大学23号館(免震棟)の風応答性状に関する研究(その2 再現期間1年風速時の応答加速度), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.199-200, 2001.9
- 3) 大熊武司, 安井八紀, 下村祥一, 小賀伸一:23号館の強風時実挙動観測, 地震・台風災害の制御低減に関するシンポジウム -制振・免震構造と実挙動観測-, 2002.3
- 4) 鈴木雅靖, 上野薫, 竹中康雄, 芳川和秀, 鈴木重信 : 高層免震建物の台風時における免震装置に関する動的加力実験, 第16回風工学シンポジウム論文集, pp.417-422, 2000.11
- 5) 竹中康雄, 山田和彦, 吉川和秀:免震用積層ゴム支承の曲線型履歴復元力モデル「修正HDモデル」, 日本建築学会技術報告集, Vol.14, pp.87-92, 2001.12
- 6) 軽部英生:神奈川大学23号館の風応答に関する解析および実験, 神奈川大学2001年度修士論文
- 7) 例えば、大熊武司, 下村祥一, 池田武:履歴ダンパー型小規模軽量免震建物の弾塑性風応答性状ならびにその解析に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.533, pp.45-52, 2000.7
- 8) 例えば、大熊武司, 二宮正行:高層建築物の風直角方向弾塑性応答性状について, 日本建築学会構造系論文集, Vol.510, pp.37-44, 1998.8
- 9) 例えば、片桐純治, 大熊武司, 丸川比佐夫:振動依存風力を考慮した風直角-振れ連成風応答解析法に関する研究, 第16回風工学シンポジウム論文集, pp.441-446, 2001.11
- 10) 丸川比佐夫, 片桐純治, 勝村章, 藤井邦雄:多質点系弾性模型の開発と高層建築物の風応答評価についての検討, 日本建築学会構造系論文集, Vol.484, pp.39-48, 1996.6
- 11) 田村哲郎, 岡田玲, 和田章: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, 日本建築学会構造系論文集, Vol.547, pp.51-58, 2001.9
- 12) 神田亮, 丸田栄蔵, 本間義教, 上田邦彦:ハイブリッド振動法による構造物の非定常空気力振動シミュレーション, 第13回風工学シンポジウム, pp.289-296, 1984.12
- 13) 吉田和彦, 大熊武司, 常木康弘 : 神奈川大学23号館(免震棟)および新1号館の振動実験(その1. 23号館(免震棟)の構造設計概要), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.807-808, 2001.9
- 14) 引田智樹, 安達直人, 内山正次, 大熊武司: 神奈川大学23号館(免震棟)および新1号館の振動実験(その2. 23号館(免震棟)の振動実験結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.809-810, 2001.9
- 15) 安達直人, 引田智樹, 内山正次, 大熊武司: 神奈川大学23号館(免震棟)および新1号館の振動実験(その3. 23号館(免震棟)免震層の復元力特性), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.811-812, 2001.9
- 16) 神奈川大学, 日建設計:神奈川大学(仮称)新3・4号館評定資料, 1998.12
- 17) 文部省:理科年表, 2001
- 18) 神尾彰彦:アルミニウム新時代