

【3.3.2 風応答シミュレーション】成果②

スタディ 2: 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: 株式会社創建エンジニアリング, *2: 神奈川大学工学部建築学科)

(*3: 当時神奈川大学工学研究科)

1. はじめに

兵庫県南部地震を契機に急激に免震建物が普及し、高さ60mを超える鋼構造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、益々長周期化の傾向にある。しかし、この長周期化の傾向は、風外力のスペクトルピーク周波数と建物の固有振動数がより接近の傾向にあるとも言えることができる。免震建物では、通常の建築物に比べて固有振動数が低く、並進と捩れの固有振動数が接近しており、通常の建築物に比べて空力不安定振動が生じる可能性が高いと考えられる。

超高層建築物に生じる空力不安定振動の検討には、空力振動模型を用いた風洞実験が有効である。しかし、弾塑性特性を有する免震建物を対象とした空力振動模型による検討は行われていない。したがって、空力不安定振動の発生も含めた免震建物の耐風性の確認のための空力振動模型の開発が必要と考えられる。

筆者らは、その第一段階として、中層免震建物である神奈川大学23号館を対象とした空力振動模型を開発し、その応答性状について文献1)～5)に公表している。以下にその要点を示す。

2. 実験模型の開発

2.1 模型の縮尺と実験風速

対象建物は地上8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(図1)。実験模型の縮尺は、風洞の閉塞率、気流の相似則、および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、設計風速に対応する実験風速を5m/sに設定した。

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(図2)。上部構造の剛性は、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。実験において想定する免震層の最大変形を1mm(実建物:200mm)とした。

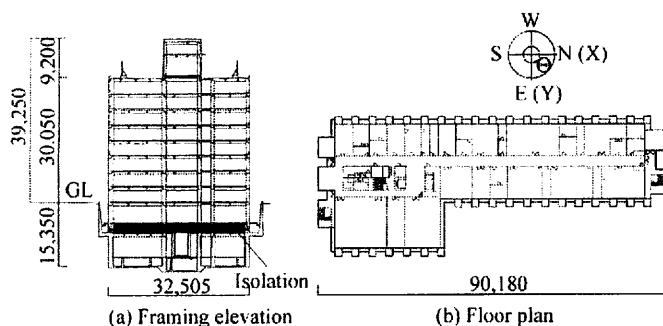


図1 建物概要

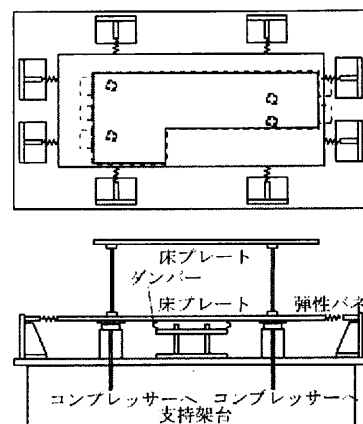


図2 実験模型の概要

2.2 積層ゴムアイソレーターの実験用モデル

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し、捩れ剛性が、実建物と相似になるようにコイルバネを配置した。模型の質量を含む鉛直力を、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、模型を浮上させた状態とした。因みに、ダンパーを組み込まない状態での模型の減衰定数は0.2%以下である。

2.3 ダンパーの実験用モデル

ダンパーの形状には図3に示す高さ S に対する想定変形が $1/10$ 以上と大きくなるため、U字型の形状を採用した。鉛ダンパーのモデルには鉛素線を、鋼棒ダンパーのモデルにはアルミニウム素線を採用し、それぞれ直径 d として0.65mm、0.5mm、高さ S として4mm、7mm、長さ L として3mm、3mmとした。また、アルミニウム素線は降伏点の焼きなまし処理により降伏点の調整を行った。

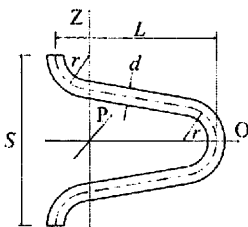


図3 模型用ダンパーの形状

3. 実験模型の基本性能

3.1 ダンパーの特性試験

模型用ダンパーの繰り返し载荷試験の結果の一例として、鋼棒ダンパーO方向(図3)について図4に示す。

一定の変位振幅値に対し一定の荷重振幅値を示している。除荷時の剛性を弾性剛性とみると、ダンパーの弾性剛性は目標の弾性剛性に概ね一致している。また、目標の降伏荷重に対し実験値は良い対応を示している。

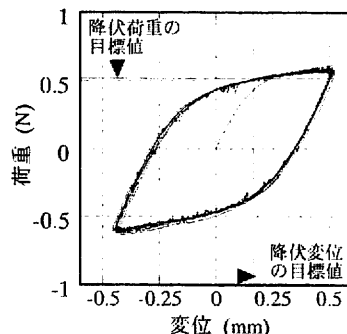


図4 模型用ダンパーの繰り返し試験結果の事例

3.2 自由振動実験

図5は自由振動実験による変位波形および振動モードである。

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5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6に示す。目標の復元力特性の弾性域と模型の弾性剛性が概ね一致していることがわかる。

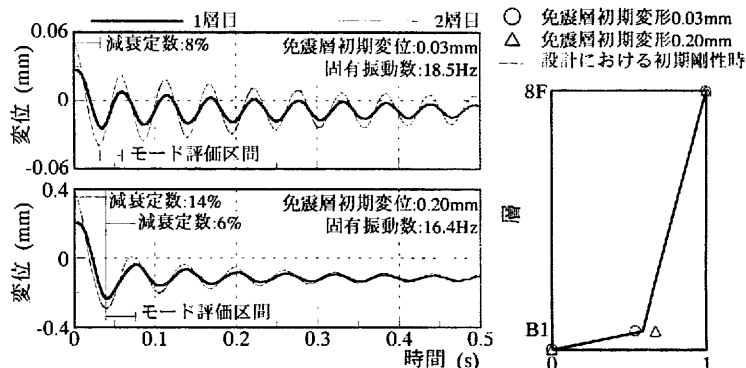


図5 自由振動波形と振動モード

4. 風応答実験

4.1 実験条件

気流は、地表面粗度区分 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 3.6m/s から 13.5m/s の間を 16 段階に変化させ、レーザー変位計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 1 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。

4.2 風速と応答変位の関係

図 7 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。

応答変位のピークファクターは、平均風速に関係なく 4.5 前後の値を示している。この結果は、対象建物である神奈川大学 23 号館に関する風応答観測結果⁹⁾と良い対応を示している。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、1.8～2.8 程度の値である。

4.3 応答変位のパワースペクトル密度

模型頂部の平均風速が 3.6m/s、8.5m/s および 13.5m/s の時の 2 層の応答変位のパワースペクトル密度を図 8 に示す。同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、振れによる変位は 2 点の差をとったものである。また、頂部平均風速 3.6m/s は模型用ダンパーが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。

4.4 平均風速と固有振動数および減衰定数の関係

実験風速と固有 1 次振動数および減衰定数の関係を図 9 に示す。なお、固有 1 次振動数および減衰定数は、応答変位のパワースペクトル密度にフィッティングすることで推定した。

実験風速 8m/s 以下では、固有振動数および減衰定数共に概ね一定で、実験風速が 8m/s を超える

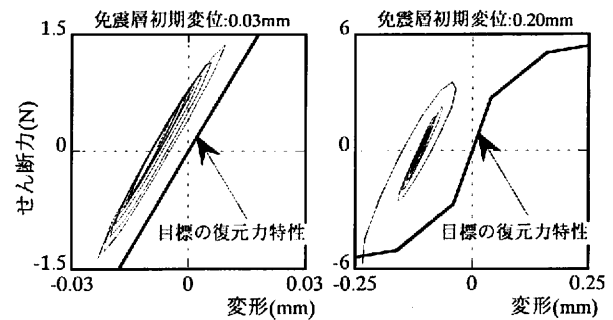


図 6 自由振動時の復元力特性

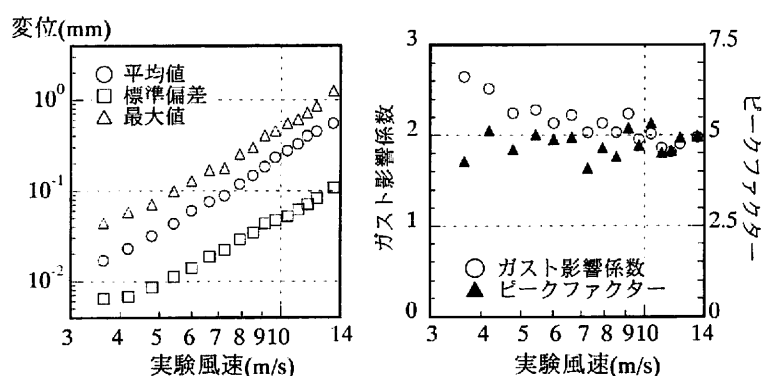


図 7 実験風速と応答変位の関係

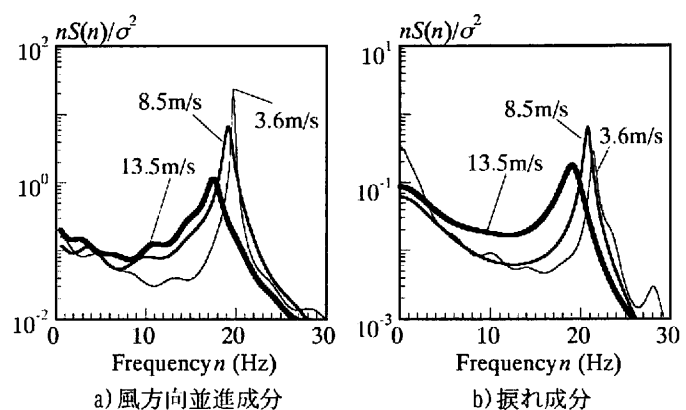


図 8 応答変位のパワースペクトル密度

と固有振動数は急激に減少し、減衰定数は急激に増加している。これは、実験風速が8.5m/s付近で鉛ダンパーが塑性化するためである。また、図5に示した減衰定数より図9での減衰定数が小さいのは、前者の応答振幅が正負に渡るものであることに対し、後者が平均風速の影響によって、片側だけの振幅になるためである。

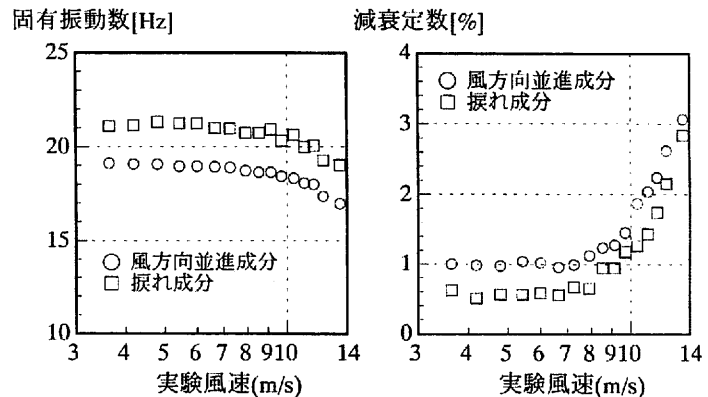


図9 実験風速と固有振動数および減衰定数の関係

5. まとめ

中低層免震建物を対象に、免震層の復元力特性を取り入れた風洞実験用多自由度弾塑性模型を開発し、基本性能および応答性状を確認した。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、両ダンパー共に弾性剛性については概ね目標値に一致した。降伏荷重については、鉛ダンパー用モデルが目標値より高めの値を示したものの、鋼棒ダンパー用モデルについては概ね目標に一致した。また、一定振幅の変形に対し一定の履歴を描き、安定した性能を示すダンパーが製作できた。
- 2) モデルの自由振動実験の結果、初期剛性時の固有振動数が目標値と良い対応を示した。
- 3) 模型用ダンパーの形状絞込みの際に用いたケーススタディは、有効であることが確認された。
- 4) 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。

以上より、鉛ダンパー用モデルの降伏荷重に若干の調整が必要なものの、本研究で取り入れた免震建物を対象とした風洞実験用弾塑性模型の開発法が妥当であることが確認された。

また、風応答性状については、以下のような知見を得た。

- 1) 応答変位のピークファクターは、平均風速に関係なく4.5前後の値を示した。この結果は、本研究の対象建物である神奈川大学23号館に関する風応答観測結果⁶⁾と良い対応を示している。
- 2) 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、1.8～2.8程度の値であった。

参考文献

- 1) 安井八紀、大熊武司、丸川比佐夫、軽部英生、下村祥一：中低層免震建物の風洞実験模型の開発、地震・台風災害の制御・低減に関するシンポジウム，pp. 81-90，2002. 3
- 2) 丸川比佐夫、大熊武司、安井八紀、軽部英生、下村祥一：中低層免震建物の風洞実験模型の開発 その1、日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 203-204，2002. 8
- 3) 安井八紀、大熊武司、丸川比佐夫、軽部英生、下村祥一：中低層免震建物の風洞実験模型の開発 その2、日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 205-206，2002. 8
- 4) 安井八紀、大熊武司、丸川比佐夫、軽部英生、下村祥一：中低層免震建物の風洞実験模型の開発、風工学シンポジウム，pp. 517-522，2002. 12
- 5) T. Ohkuma, H. Yasui, H. Marukawa: Development of wind tunnel test model of mid-rise base-isolated building, Wind & Structures Vol. 7, No. 3, pp. 203-214, 2004
- 6) 大熊武司、安井八紀、小賀伸一、下村祥一：23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，pp. 69-80，2002. 3