CFD 解析による免震建物の設計用風荷重評価に関する基礎的検討

Fundamental Study on CFD-Based Evaluation of Design Wind Loads for Base-Isolated Buildings

新井　雄大*1，小島　千里*1，川島　学*1，平田　裕一*1
YUDAI ARAI, CHISATO KOJIMA, MANABU KAWASHIMA, YUICHI HIRATA

免震建物の設計用風荷重評価への CFD 解析の適用性を検討するため，角柱モデルおよび階段室を模擬した突出部を有する板状モデルを対象に風洞実験と CFD 解析を実施した。建物全体に作用する風力係数，風力のスペクトル特性およびベースシア係数を比較した結果，CFD 解析結果は風洞実験結果と一定程度対応することを確認した。また，免震建物の設計用風荷重評価に関するケーススタディを行い，CFD 解析の免震構造の設計用風荷重評価への適用可能性を示す結果が得られた。

キーワード：免震構造，風応答ランク，設計用風荷重，風洞実験，CFD 解析

Wind tunnel tests and CFD analyses were conducted on a square prism model and a slab-type model with a protruding stairwell section to investigate the applicability of CFD to design wind load evaluation for base-isolated buildings. Comparisons of wind force coefficients, spectral characteristics, and base shear coefficients showed reasonable agreement between the CFD and wind tunnel results. A case study on design wind load evaluation for base-isolated buildings provided results suggesting the applicability of CFD.

Keywords: Base-isolated structure, Wind response rank, Design wind load, Wind tunnel test, CFD analysis

1. はじめに

日本免震構造協会「免震建築物の耐風設計指針（2023）」[1]（以降，免震耐風指針）には，免震層や建物条件に応じて日本建築学会「建築物荷重指針・同解説」[2]（以降，荷重指針）や風洞実験等に基づいて風直交方向の影響を考慮して設計用風荷重を算定し，免震層の応答状態を 3 段階のランクに分類したうえでランクごとに耐風安全性を検証する枠組みが示されている。荷重指針は，風荷重の算定における基本的な指針の一つであるが，矩形や円形といった平面形状を有する建物形状を前提としているため，複雑な平面形状を有する建物や突出部を有するなど不整形な建物に対しては，実際の風荷重と必ずしも整合しない場合がある。このような場合に，前述の枠組みを適切に利用するためには，風荷重評価に用いる手法やその精度について十分に検討する必要がある。

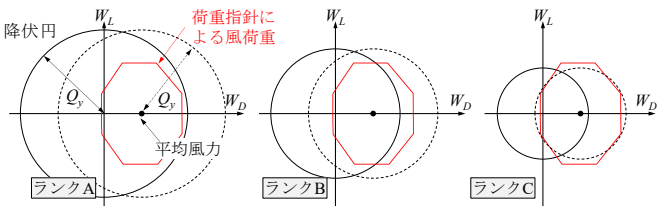
風洞実験は実際の流れ場に近い条件を再現できる一方，模型製作や実験に時間を要する。これに対し，近年は CFD 解析技術が進展し，風洞実験と比較して短期間に結果が得られる手法として期待されている。設計用風荷重の評価において，CFD 解析により風洞実験と同等の精度が確認できれば，免震建物の耐風設計に活用できると考えられる。本報では，角柱モデルおよび板状モデルを対象としたケーススタディを行い，免震層のランク分類に用いる設計用風荷重評価に対する CFD 解析の適用性を検証する。

2. 免震層の風応答ランク [1),3)]

免震耐風指針には，風直交方向の影響を考慮した風荷重に対する免震層の応答レベルに基づいて免震層を 3 段階のランクに分類し，ランクごとに耐風安全性に関する検証事項が整理されている。**図-1** に，免震層の応答レベルによるランクの分類を示す。なお，同図は荷重指針により風荷重を算定した場合を例示している。

*1 技術研究所技術開発推進部

図-1 に示すように，各方向における風荷重と免震層の降伏耐力 Q_y の大小関係は，横軸を風方向風荷重 W_D，縦軸を風直交方向風荷重 W_L とした平面上に，Q_y を半径とする円（降伏円）を，原点を中心とする場合と平均風力を中心とする場合についてそれぞれ描くことで図示できる。免震層の風荷重（平均成分+変動成分）および変動成分のみに対する免震層の弾性限超過の有無に基づき，免震層はランク A，B，C に分類される。特に，変動成分に対して弾塑性挙動するランク C では，原則として時刻歴応答解析により検証を行う必要がある [1]。



（W_D：風方向風荷重，W_L：風直交方向風荷重，Qy：免震層の降伏耐力）

ランク A：免震層は弾性挙動
ランク B：免震層は弾性限界を超えるが，変動成分に対しては弾性挙動
ランク C：免震層は弾性限界を超え，変動成分に対しても弾塑性挙動

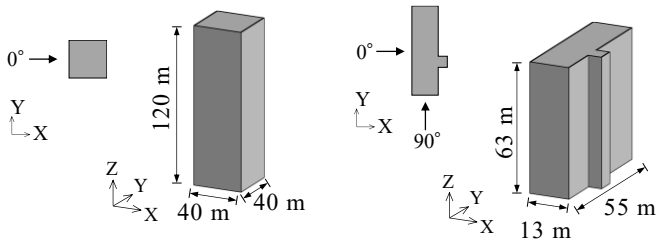
図-1　免震層の応答レベルによるランク分類 [1]

免震耐風指針においては「免震層のランク C の場合や荷重指針等の適用範囲外の場合は，風洞実験等よく吟味された方法に基づいて」風荷重を算定することが示されている。本報は，免震層の風応答ランク判定ならびに耐風設計時において，CFD 解析の「風洞実験等よく吟味された方法」[1]としての適用可能性を検証することを目的とした基礎的検討として，形状の異なる 2 つの建物モデルの風洞実験および CFD 解析を実施し，超高層免震建物の極めて稀に発生する暴風時の設計用風荷重評価における CFD 解析の適用性について検討する。

3. 風洞実験および CFD 解析

(1) 検討用建物

検討対象とする建物モデルは，超高層建物を模擬した角柱モデル [4),5)]（**図-2(a)**）および高層板状住宅を模擬した板状モデル（**図-2(b)**）の 2 種類とし，いずれも基準風速を 34 m/s，地表面粗度区分 III の平坦地に建つ基礎免震建物を想定した。板状モデルは長手方向に階段室を想定した突出部を有する形状とし，建物重量は床面積当たり 12～16 kN/m² として設定した。風入力条件は，角柱モデルでは X 方向および Y 方向の見付け面積および振動特性が等しいことから，風向 0°のみを対象とした。板状モデルでは風向 0°および 90°の 2 方向とした。



(a) 角柱モデル　　(b) 板状モデル

図-2　検討用建物モデル

(2) 風洞実験および CFD 解析の概要

風洞実験では，対象建物を風圧模型で再現し，建物表面に設けた複数の測定点において風圧を離散的に計測した。模型頂部高さにおける平均風速は相似則に従い $U_H = 10$ m/s とし，各サンプルについて 10 分間の時刻歴データを取得し，以降の検証に用いた。

CFD 解析は，Large Eddy Simulation（LES）を用いて対象建物周辺の流れ場を解析した。計算格子には非構造四面体メッシュを用い，CFD 荷重算定マニュアル [6)]に基づいて計算領域を設定した。流入境界では，風洞実験の風速プロファイルに基づき CDRFG 法 [7)]により生成した乱流変動を与えた。解析には OpenFOAM v2106 を使用し，1 ケースのみ実施し 10 分間相当の時刻歴データを取得した。

なお，風洞実験および CFD 解析における風速プロファイルについては，文献 8)を参照されたい。

(3) 風力の比較

表面風圧分布を積分して算出した建物全体に作用する風力ならびに転倒・ねじりモーメントについて，風洞実験および CFD 解析から得られた各方向の風力係数とモーメント係数の平均値および標準偏差を**表-1** に示す。なお，風洞実験については，10 サンプルのアンサンブル平均により算出した平均値および標準偏差を示している。

すべてのケースにおいて，CFD 解析における風力係数は風洞実験結果とおおむね良好に一致した。特に角柱お

および板状モデルの風向 0°入力における C_{FX} と C_{MY} の平均値や，板状モデルの風向 0°入力における C_{FY} や C_{MX} の平均値は，風洞実験と CFD 解析の両者で近い値を示しており，建物に作用する平均風荷重および転倒モーメントを良好に再現できていることが確認できる。一方，標準偏差に関しては CFD 解析の方がやや大きく評価されるケースがみられるものの，全体的な傾向は風洞実験と良く対応している。

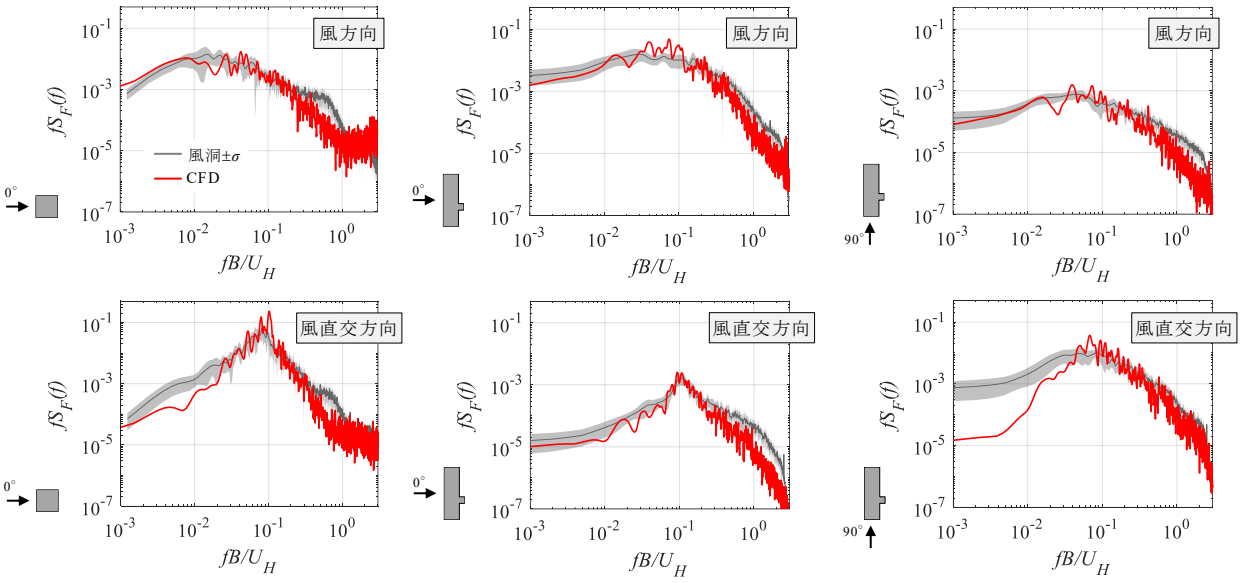
表-1　風力係数（平均値±標準偏差）

風力係数	方法	角柱モデル 風向 0°入力	板状モデル 風向 0°入力	板状モデル 風向 90°入力
C_{FX}	風洞	0.958 ± 0.269	1.154 ± 0.315	0.089 ± 0.220
	CFD	1.014 ± 0.266	1.184 ± 0.367	0.032 ± 0.223
C_{FY}	風洞	-0.005 ± 0.301	-0.006 ± 0.055	0.221 ± 0.068
	CFD	-0.002 ± 0.379	-0.005 ± 0.054	0.196 ± 0.066
C_{MX}	風洞	-0.004 ± 0.153	0.004 ± 0.032	-0.140 ± 0.043
	CFD	0.003 ± 0.179	0.003 ± 0.031	-0.126 ± 0.040
C_{MY}	風洞	0.522 ± 0.145	0.712 ± 0.197	0.051 ± 0.128
	CFD	0.544 ± 0.138	0.728 ± 0.220	0.018 ± 0.130
C_{MZ}	風洞	0.000 ± 0.061	0.008 ± 0.030	-0.046 ± 0.039
	CFD	0.003 ± 0.040	0.006 ± 0.022	-0.033 ± 0.038

C_{FX}，C_{FY}：X，Y 方向の風力係数
C_{MX}，C_{MY}，C_{MZ}：X，Y および Z 軸回りの転倒モーメント係数

図-3 に，角柱モデルおよび板状モデルの風向 0°，90°入力における風方向・風直交方向の風力のパワースペクトル密度を示す。横軸は，無次元振動数 fB/U_H（f：振動数，B：風向方向に対する建物の見付け幅），縦軸は，$fS_F(f)$（$S_F(f)$：パワースペクトル密度）である。風洞実験結果は，独立に取得した 10 サンプルのスペクトルをアンサンブル平均したものであり，平均値±標準偏差を併記している。

$fS_F(f)$は，風方向ではすべてのケースにおいて風洞実験と CFD 解析の両者で $fB/U_H = 10^{-2}$～10^{-1} 付近にピークが認められ，高振動数領域で低下する傾向がみられた。風直交方向では，風方向に比べてより明瞭なピークが確認され，特に角柱モデルでは卓越振動数近傍にエネルギーが集中する傾向がみられた。風方向および風直交方向のいずれにおいても，すべてのケースで風洞実験と CFD 解析はスペクトル形状およびピーク振動数帯域について良好な一致を示しており，CFD 解析は風洞実験結果をおおむね再現している。一方，$fB/U_H \geq 10^0$ の高振動数領域では，CFD 解析が風洞実験結果をやや過小評価する傾向が確認された。これは主としてメッシュ解像度の制約に起因するものと考えられる。ただし，当該振動数領域の応答への寄与は小さいことから，風荷重算定への影響は限定的であると考えられる。以上より，風力のスペクトル特性について，CFD 解析は風洞実験結果をおおむね良好に再現できていることが確認された。



(a) 角柱モデル　　(b) 板状モデル

図-3　風力のパワースペクトル密度

4. CFD 解析結果を用いた設計用風荷重評価

免震耐風指針に示される免震層のランク分けに対し，風洞実験および CFD 解析により得られた風力を利用して風荷重を評価し，CFD 解析の有効性を検証する。具体的には，風洞実験および CFD 解析から得られた風力の時刻

歴を外力として時刻歴応答解析を実施し，ベースシア係数を比較する。なお，時刻歴応答解析は免震層固定とした線形多質点系モデルで実施した。角柱モデルは X，Y 方向の 1 次固有振動数をいずれも 0.42 Hz，板状モデルは X，Y 方向の 1 次固有振動数をそれぞれ 1.23 Hz，0.69 Hz とした。いずれのモデルにおいても，減衰は 1 次モードでの減衰定数が 0.02 の剛性比例型減衰マトリクスとして与えた。

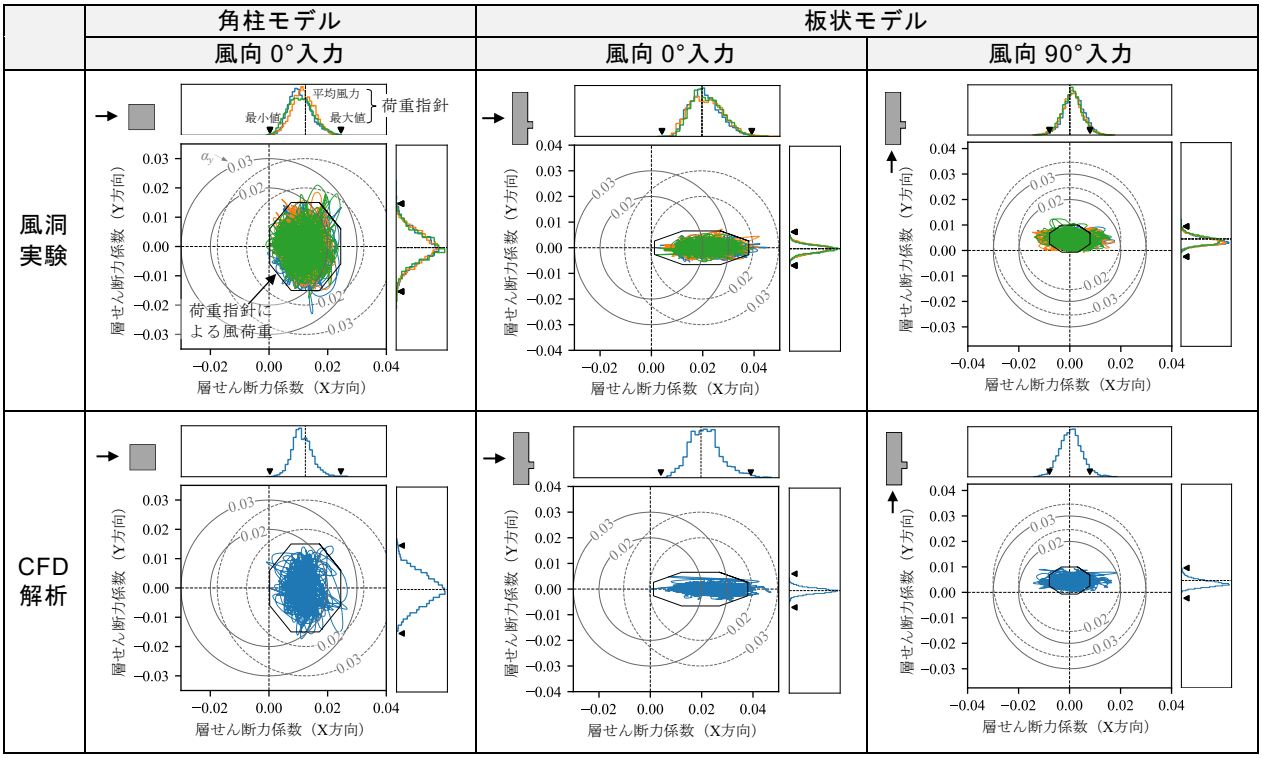
図−4 に各モデルにおいて風洞実験（3 サンプル）および CFD 解析の結果から時刻歴応答解析により評価したベースシア係数の荷重履歴を示す。同図には，荷重指針に基づき風方向および風直交方向の荷重を求めて，免震耐風指針の方法に倣って組み合わせた風荷重をベースシア係数として示すとともに，免震層の降伏層せん断力係数 α_y = 0.02，0.03 を例として，原点を中心とした降伏円および平均風力の分だけシフトさせた降伏円を重ねて示している。また，風洞実験および CFD 解析より得られた風荷重については，各風向におけるベースシア係数の縦軸を最大値で規格化したヒストグラムを示す。なお，荷重指針による算定においては，板状モデルに存在する突出部は考慮せず，矩形建物として風荷重を評価した。

風洞実験により得られた 3 サンプルのベースシア係数のヒストグラムを比較すると，いずれのケースにおいても，各サンプルがおおむね重なっており，大きな差異は確認されなかった。角柱モデルおよび板状モデルのいずれにおいても，風洞実験および CFD 解析により得られた風方向の風荷重に関する分布は正規分布からの偏りが認められた。

角柱モデルについては，風洞実験，CFD 解析および荷重指針において風方向のベースシア係数はおおよそ 0.024 程度，風直交方向では 0.015 程度の値を示した。荷重指針による風荷重に基づいて免震層のランクを判定すると，α_y = 0.03 の場合にはランク A に相当し，α_y = 0.02 ではランク B となる結果であった。

板状モデルでは，風向 0°入力時の風方向のベースシア係数が約 0.038 と比較的大きな値を示したが，風直交方向では約 0.006 であった。風向 90°入力時には，風方向で約 0.010 となり，風直交方向については荷重指針では約 0.008 であるのに対し，風洞実験および CFD 解析結果では約 0.015 であった。荷重指針の風荷重でランクを判定すると，α_y = 0.02，0.03 ともにランク B に相当する結果であった。

いずれのケースにおいても，風洞実験結果と CFD 解析結果はおおむね良好に対応していることが確認できる。荷重指針との対応については，板状モデルの 90°入力時の風直交方向荷重を除き，荷重指針が風洞実験および CFD 解析結果をおおむね包絡している。風洞実験および CFD 解析の結果において各サンプルでの最大値が局所的に上回ることはあるが，ヒストグラムより統計的にはおおむね荷重指針によって捉えられているといえる。



図−4　免震層の降伏層せん断力係数とベースシア係数の関係

同図で板状モデルの風向 90°入力時の風直交方向荷重については，風洞実験および CFD 解析による荷重履歴は荷重指針による評価値より大きい傾向があった。板状モデルの CFD 解析において，ある時刻での建物周辺の風速分布（**図-5**）を確認すると，90°入力時には，突出部背面側において再付着が生じる一方，反対面側では突出部において剥離が生じ，再付着が生じにくい流れ場となっていることが確認できる。これにより，建物左右の圧力差が生じ，付加的な風力が発生しているものと考えられる。

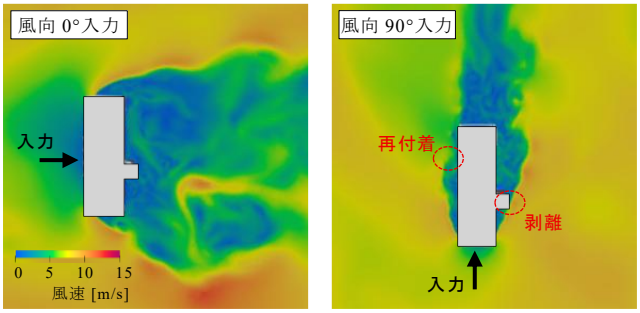


図-5　板状モデル周りの風速分布

以上より，CFD 解析は，整形ではない建物形状に対しても風洞実験結果と同等な結果が得られる方法であり，免震層の設計用風荷重の算定に適用できると考えられる。さらに風の流れ場の可視化も可能となることから，CFD 解析は結果の解釈においても有効である。

5. まとめ

本報では，日本免震構造協会「免震建築物の耐風設計指針（2023）」[1]に示されている免震建物の耐風設計における風応答ランク分類への CFD 解析の適用可能性を検証することを目的として，角柱モデルおよび板状モデルを対象として風荷重の評価を行った。いずれの建物モデルにおいても，風洞実験と CFD 解析結果を利用した風荷重は一定程度対応していることが確認された。また，CFD 解析による免震建物の設計用風荷重評価の一事例を示し，適用可能性を検討するための基礎的な結果が得られた。

謝辞：本研究を進めるにあたり，近畿大学の野田 博教授には，多岐にわたり有益なご指導ならびにご助言を賜った。ここに深甚なる謝意を表する。また，本研究の数値計算には，最先端共同 HPC 基盤施設（JCAHPC）が運用するスーパーコンピュータ Miyabi を利用した。

参考文献

1) 日本免震構造協会：免震建築物の耐風設計指針，2023.3
2) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，2015.2
3) 安井八紀，吉江慶祐，佐藤大樹，大熊武司，島岡俊輔：風荷重の組合せを考慮した免震建築物の簡易風応答評価方法，日本建築学会技術報告集，第 29 巻，第 71 号，pp.74-79，2023.2
4) 小島千里，ドアンセイ ロン，川島学，野田博：流入境界において Random Flow Generation 法を用いた建物モデルの LES シミュレーション その 1-2，日本建築学会大会（九州）学術講演集，構造 I，pp.31-34，2025.7
5) Long Doan Sy, Chisato Kojima, Manabu Kawashima, Yuichi Hirata, Hiroshi Noda : Evaluation of synthetic turbulence generation for LES-based wind load estimation on square buildings，The 8th International Symposium on Computational Wind Engineering，2026.6
6) 日本建築学会：CFD 荷重算定マニュアル，2024
7) Aboshosha, H., A. Elshaer, G. T. Bitsuamlak and A. El Damatty. Consistent inflow turbulence generator for LES evaluation of wind-induced responses for tall buildings. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 142: 198-216, 2015
8) ドアンセイ ロン，新井雄大，小島千里，川島学，平田裕一，野田博：高層免震建物の設計用風荷重評価における CFD 解析の適用性 その 1-2，日本建築学会大会（中国）学術講演集，構造 II，pp.175-178，2026.7