

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	超高層建物の応答に対する風力の影響評価指標 その1 風力の変動成分の違いが応答に及ぼす影響
Title(English)	Index for evaluating the impact of wind force on the response of high-rise buildings Part1 Effects of different wind force variability components on response
著者(和文)	沖村将大, 佐藤大樹, 田中英之, 曾根孝行, 渡井一樹, 畔上泰彦, 今野大輔
Authors(English)	OKIMURA Masahiro, SATO Daiki, TANAKA Hideyuki, SONE Takayuki, WATAI Kazuki, AZEGAMI Yasuhiko, KONNO Daisuke
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 465-468
Citation(English)	, , , pp. 465-468
発行日 / Pub. date	2024, 3
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

超高層建物の応答に対する風力の影響評価指標

その 1 風力の変動成分の違いが応答に及ぼす影響

構造—振動

風洞実験 CFD 超高層建物
時刻歴応答解析 1 次モード パワースペクトル密度

正会員 ○ 沖村将大^{*1} 正会員 佐藤大樹^{*2}
" 田中英之^{*3} " 曾根孝行^{*3}
" 渡井一樹^{*3} " 畔上泰彦^{*3}
" 今野大輔^{*3}

1. はじめに

近年の施工技術の発展に伴う建物のさらなる高層化が予想される中、風応答評価の重要性が増している。超高層建物の風応答を評価する際に用いる風力は風洞実験や数値流体計算（以下、CFD）から得られる。

風洞実験および CFD の流入変動風の性状は、風方向風力や風上面の風圧係数に大きな影響を与えるため¹⁾、一般に流入変動風の性状を建築物荷重指針・同解説(2015)²⁾（以下、荷重指針）との比較が行われている。しかし、流入変動風の性状がおおむね一致していても、同程度の風応答が得られる保証はない。実際に筆者ら^{3), 4)}は 2 種類の風力を用いた時刻歴応答解析結果から、気流性状がおおむね一致する 2 種類の風力による応答にも差が生まれる場合があることを確認した。また、超高層建物の風応答を時刻歴応答解析によって評価する際、質点に作用する風力の時刻歴波形（以下、風力）を用いて時刻歴応答解析を行った場合、どのような応答を算出するのかを解析前に評価することが重要となる。文献 5) では風洞実験と CFD それぞれの一般化風力のパワースペクトル密度 (PSD) およびスペクトルモーダル解析による応答を比較し、応答の差の原因を風力の PSD の差から考察しているが、その風力評価は定性的なものに留まっている。新たに風洞実験や CFD から得られた風力を定量的な値（指標）で評価できれば、事前に応答を極端に過大（もしくは過小）に算出する風力の判別や時刻歴応答解析に使用する風力の選択が可能であり、風力の評価にとって大変有用であると考えられる。風応答への影響に着目した風力を評価するための指標には、評価の基準が必要である。そこで本報では、指標としての一般性を持たせるために、荷重指針を基準とした応答への風力の影響を定量的に評価できる指標の提案を目的とする。本報その 1 では、風力特性の違いが風応答に与える影響を分析し、本報その 2 では本報その 1 の分析結果に基づき、荷重指針を基準として、応答への

影響に着目した風力の評価指標を提案する。

2. 対象建物および風洞実験と CFD の概要

2.1 対象建物

本報では建物高さ $H=200\text{ m}$ 、辺長比 $B/D=1.0$ 、アスペクト比 $H/B=5.0$ (B, D : 建築物の幅, 奥行) の超高層建物を想定した風洞実験⁶⁾および CFD⁷⁾の結果を用いて風応答への影響に着目した風力の評価指標を提案する。風洞実験および CFD の詳細についてはそれぞれ文献 6) および文献 7) を参照されたい。

2.2 気流性状の比較

図 1(a), (b) に風洞実験⁶⁾および CFD⁷⁾の平均風速 U_z 、乱れ強さ I_z を示す。同図に荷重指針²⁾に基づき算出した U_z および I_z を併記する。縦軸は風速の測定高さ Z を実験模型および CFD の建物モデルの頂部高さ H で基準化した高さとする。これ以降、添え字の T は風洞実験の値、 C は CFD の値を表す。図 1(a) から U_{zT} , U_{zC} 、荷重指針の値は精度よく一致していることがわかる。図 1(b) より、 I_{zT} および I_{zC} は荷重指針の値の $\pm 20\%$ の範囲内に収まっており、 I_{zT} と I_{zC} はおおむね一致していることが確認できる。

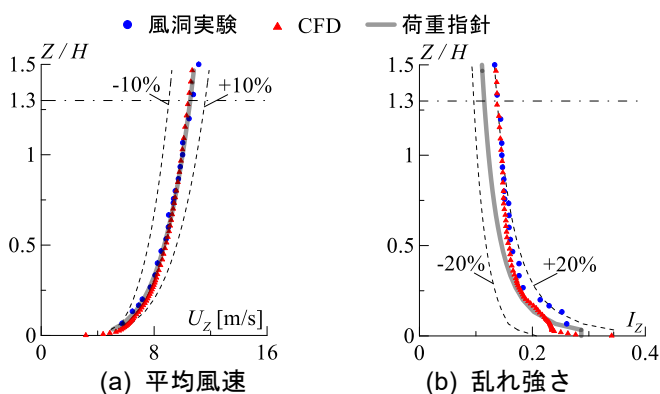


図 1 気流性状の比較

Index for evaluating the impact of wind force on the response of high-rise buildings

Part1 Effects of different wind force variability components on response

OKIMURA Masahiro, SATO Daiki, TANAKA Hideyuki
SONE Takayuki, WATAI Kazuki, AZEGAMI Yasuhiko,
KONNO Daisuke

3. 1 次モードに着目した応答評価

3.1 解析モデルと風力概要

本論その 1 では高さ $H=200\text{ m}$ 、辺長比 $B/D=1.0$ 、アスペクト比 $H/B=5.0$ の超高層建物を対象とする。1 次固有周期 ${}_1T_f=5.0\text{ s}$ 、建物密度 $\rho_f=175\text{ kg/m}^3$ とし、 ${}_1T_f$ に対して 1 次減衰定数 ${}_1\zeta_f=0.02$ を用いた。対象建物の 1 次モードの風応答に注目するため、1 次モード $\{ {}_1\Phi_f \}$ を直線と仮定した水平 1 自由度の 1 質点系モデルを用いる。なお、1 次モーダル質量 ${}_1M$ と 1 次モーダル剛性 ${}_1K$ および後述の 1 次モーダル風力 ${}_1F(t)$ は、 ${}_1M$ が $1.0\text{ kN}\cdot\text{s}^2/\text{cm}$ となるように正規化したモード ${}_1\Phi_{fi}$ (正規化モード) を用いたときの値とした。

建物に作用する風力は荷重指針²⁾に基づき、風洞実験⁶⁾および CFD⁷⁾により得られた層風力係数データを対象建物における基準風速を 36 m/s として再現期間 500 年の風力 $F(t)$ へ変換を行ったものを用いる。なお、小地形の影響、季節係数および風向係数の影響は考慮していない。また、風向角は 0° とし、1 組につき 10 質点分の波形を 0.05 秒刻み 14000 (700 s) ステップとして、5 組ずつ取り出した。上記の $F(t)$ を式(2)で表される 1 次モーダル風力 ${}_1F(t)$ として 1 質点系モデルに与える。

$${}_1F(t) = \{ {}_1\Phi_{fi} \} \{ F(t) \} = \sum_{i=1}^{10} {}_1\Phi_{fi} \cdot F_i(t) \quad (2)$$

なお、添え字の i は層数を表す。また、図 2 に 1 次モーダル風力の時刻歴波形の例を示す。

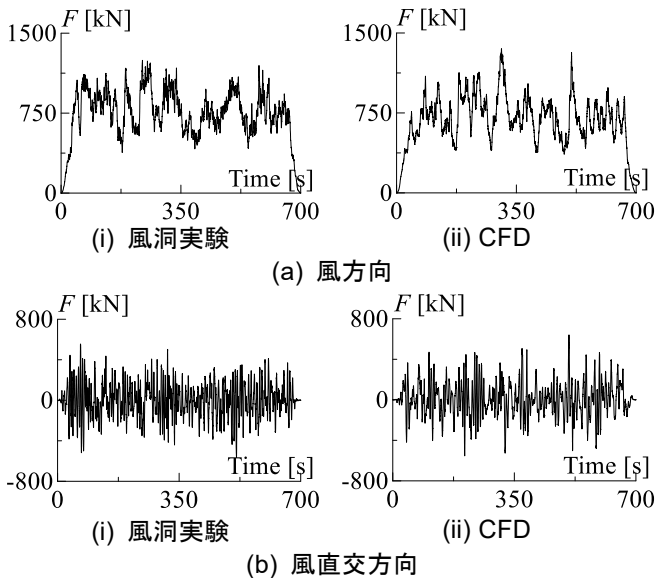


図 2 1 次モーダル風力の時刻歴波形

3.2 風力の準静的成分および共振成分の評価

図 3(a), (b) に風方向および風直交方向の風洞実験および CFD の 1 次モーダル風力のパワースペクトル密度 (PSD) ${}_1S_{Fd}$ および ${}_1S_{Fl}$ をそれぞれ示す。以降、風力および応答評価はそれぞれ 5 波のアンサンブル平均で評価する。図中

に荷重指針より求めた 1 次モーダル風力の PSD と検討対象の建物の 1 次固有振動数 ${}_1f$ ($=0.2\text{ Hz}$) を併記する。ここで、図 3 に示すように、PSD を図中に示す境界振動数 f_b を境に準静的成分と共振成分に分離し^{8),9)}、それぞれの面積の平方根 (標準偏差) を評価する。本論文では文献 8), 9) の手法を準用して、 f_b を ${}_1f/3$ とする。また、表 1 に風洞実験、CFD および荷重指針の風方向の準静的成分の標準偏差 ${}_1\sigma_{FB}$ と両方向の共振成分の標準偏差 ${}_1\sigma_{FR}$ を示す。本章では荷重指針の値を基準として、風洞実験および CFD の値を評価し、その大小関係を確認する。はじめに、風方向風力の準静的成分の評価を行う。図 3(a) および表 1 から、風方向の ${}_1\sigma_{FB}$ は荷重指針 < 風洞実験 < CFD の大小関係である。続いて、風方向風力の共振成分の評価について述べる。図 3(a) および表 1 から、風方向の ${}_1\sigma_{FR}$ は荷重指針 < CFD < 風洞実験の大小関係であることがわかる。最後に、風直交方向風力の共振成分の評価について示す。図 3(b) および表 1 から、風直交方向の ${}_1\sigma_{FR}$ は荷重指針 $\approx$ 風洞実験 < CFD の大小関係であることが確認できる。

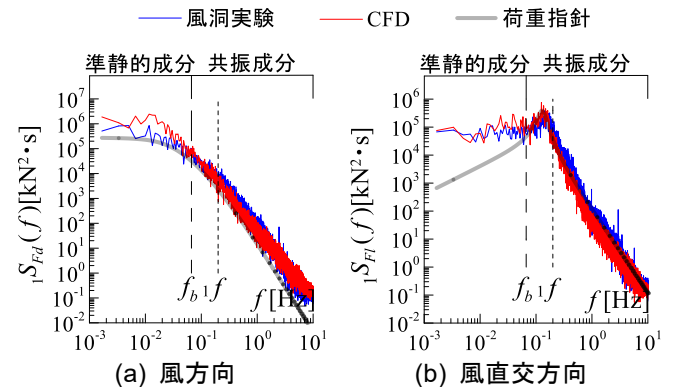


図 3 風力のパワースペクトル密度

表 1 風力の各振動数成分の標準偏差

	風方向		風直交方向
	準静的成分	共振成分	共振成分
	${}_1\sigma_{FB}$	${}_1\sigma_{FR}$	${}_1\sigma_{FR}$
風洞実験	121.5	61.5	158.1
CFD	206.8	59.3	163.6
荷重指針	87.3	38.7	157.6

* 青字は荷重指針の値より大きい値、赤字は荷重指針の値より小さい値を表す

3.3 1 次モード応答の比較

表 2(a), (b) それぞれに風方向と風直交方向における風洞実験および CFD の風力による 1 次モード応答 (変位, 速度, 加速度) の標準偏差 ${}_1\sigma$ (${}_1\sigma_D$, ${}_1\sigma_V$, ${}_1\sigma_A$) を示す。表には荷重指針により算出した ${}_1\sigma$ も併記する。表 2(a) より、風方向の ${}_1\sigma_D$ は荷重指針 < 風洞実験 < CFD の大小関係があることが確認できる。また、 ${}_1\sigma_V$ および ${}_1\sigma_A$ はどちらも荷重指針 < CFD < 風洞実験の大小関係がある。続いて、表

2(b)から、風直交方向において、全ての 1σ でCFD≒荷重指針<風洞実験の大小関係があることがわかる。以上から、気流性状がおおむね一致するような2種類の風力においても、風力の変動成分に差があることで、それら風力による応答にも差が生まれることが確認できる。

表 2 1 質点系の応答の標準偏差

(a) 風方向

	変位 $1\sigma_D$	速度 $1\sigma_V$	加速度 $1\sigma_A$
風洞実験	171.2	186.1	234.2
CFD	187.1	159.0	196.6
荷重指針	104.8	106.3	131.8

(b) 風直交方向

	変位 $1\sigma_D$	速度 $1\sigma_V$	加速度 $1\sigma_A$
風洞実験	540.7	657.8	816.1
CFD	364.1	419.1	508.3
荷重指針	377.3	444.9	543.8

* 青字は荷重指針の値より大きい値、赤字は荷重指針の値より小さい値を表す

3.4 応答の準静的成分および共振成分の比較

図 4 に風洞実験、CFD による 1 次モード応答のパワースペクトル密度 (PSD) を示す。変位、速度、加速度の PSD をそれぞれ $1S_D$ 、 $1S_V$ 、 $1S_A$ とし、上記以外の添え字の d は風方向、 l は風直交方向を表す。図中には荷重指針による 1 次モード風力の PSD を用いて、スペクトル応答解析¹⁰⁾により算出した応答 (変位、速度、加速度) の PSD を併記する。3.2 節と同様に、図中に検討対象の建物の 1 次固有振動数 $1f$ ($=0.2$ Hz) と境界振動数 f_b ($=1f/3$) を併記し、 f_b を境とする準静的成分と共振成分に分けて分析する。図 4 から、全ての応答の PSD は $1f$ でピークをとることがわかる。また、風方向変位に限り、PSD の準静的成分がピークに近い値をとることも確認できる。表 3(a)、(b)と表 4(a)、(b)に風方向および風直交方向における 1 次モードの変位、速度および加速度の準静的成分の標準偏差 ($1\sigma_{DB}$ 、 $1\sigma_{VB}$ 、 $1\sigma_{AB}$) と共振成分の標準偏差 ($1\sigma_{DR}$ 、 $1\sigma_{VR}$ 、 $1\sigma_{AR}$) を示す。表には荷重指針により算出した値も併記する。また、ある応答の標準偏差 $1\sigma_X$ は式(3)に示すように、その応答の準静的成分の標準偏差 $1\sigma_{XB}$ と共振成分の標準偏差 $1\sigma_{XR}$ の二乗和平方根であることから、応答の標準偏差に対する各成分の影響を確認するため、括弧内に応答の標準偏差の 2 乗 (分散) に占める各成分の標準偏差の 2 乗 (分散) の割合を示す。

$$1\sigma_X = \sqrt{1\sigma_{XB}^2 + 1\sigma_{XR}^2} \quad (3)$$

本節では応答の準静的成分と共振成分それぞれの標準偏差について、風洞実験および CFD の風力による値を荷重指針の値と比較し、3.3 節の 1 次モード応答の標準偏差

への影響を分析する。表 3(a)から、風方向の変位では、 $1\sigma_{DB}^2$ の $1\sigma_D^2$ に占める割合が風洞実験ではおよそ 21%、CFD ではおよそ 50%と、その影響が無視できないことがわかる。 $1\sigma_{DB}$ の大小関係に着目すると、荷重指針<風洞実験<CFD である。表 3(b)より、風方向変位の共振成分の大小関係に着目すると、荷重指針<CFD<風洞実験である。ここで、3.3 節で示した風方向における $1\sigma_D$ の関係と $1\sigma_{DB}$ の関係が一致していることが確認できる。よって、風方向変位への影響は、応答の準静的成分の方が共振成分より大きいことがわかる。また、応答の PSD は、風力の PSD に特定の伝達関数を乗ずることで算出できることから、ある範囲の応答の PSD の大小関係は、同じ範囲の風力の PSD の関係と一致することが予想される。そのため、表 1 の風方向風力の準静的成分の標準偏差 $1\sigma_{FB}$ を確認すると、風方向変位と同様の大小関係であることが確認できる。よって、風方向風力の準静的成分は風方向変位に影響し、風方向の $1\sigma_{FB}$ は風方向変位への影響に着目した風力の評

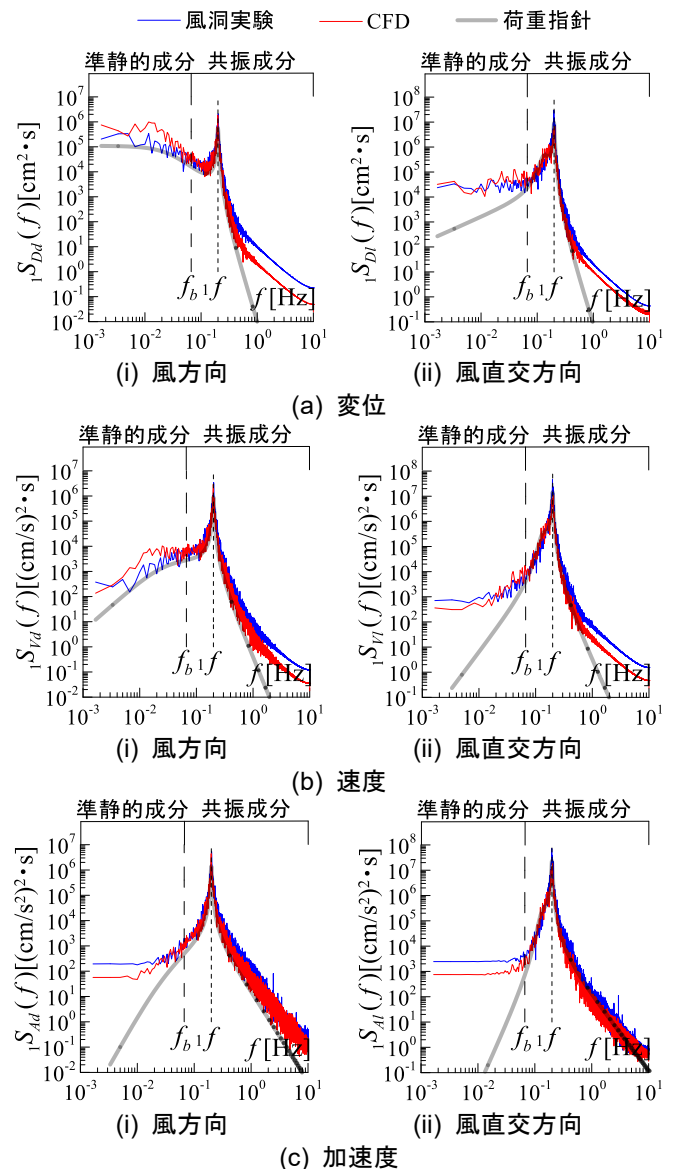


図 4 応答のパワースペクトル密度

価指標とすることができる。

風方向の速度および加速度では、 $1\sigma_{VB}^2$ および $1\sigma_{AB}^2$ の $1\sigma_V^2$ および $1\sigma_A^2$ に占める割合が非常に小さいことがわかる。そこで、 $1\sigma_{VR}$ および $1\sigma_{AR}$ の大小関係を確認すると、どちらも荷重指針<CFD<風洞実験であり、3.3節で示した $1\sigma_V$ および $1\sigma_A$ の関係と一致していることが確認できる。よって、風方向の速度および加速度の標準偏差には、共振成分の影響の方が大きいことがわかる。続いて表4(a)および(b)から、風直交方向では、風方向の速度および加速度と同様の理由から、全ての応答の標準偏差に対する応答の共振成分の影響の方が大きいことがわかる。共振成分の標準偏差の関係も、表2(b)の風直交方向応答の標準偏差と同様にCFD≒荷重指針<風洞実験である。前述の応答のPSDと風力のPSDの関係を考えると、風力の風方向速度と加速度および風直交方向変位、速度、加速度への影響に着目した風力評価のためには風力の共振成分の評価が重要となるといえる。しかし、表1に示す風直交風力の共振成分の標準偏差と風直交方向変位、速度、加速度は異なる大小関係を示すため、風力の共振成分の標準偏差 $1\sigma_{FR}$ は風応答への影響に着目した風力評価に用いることはできず、別の評価指標が必要である。

4. 結論

本報その1では、1次モーダル風力の準静的成分および共振成分に着目し、風力特性が風応答に与える影響を分析した。以下にまとめを示す。

- 風方向風力の準静的成分は風方向変位応答（標準偏差）に影響し、風方向風力の準静的成分の標準偏差は風方向変位への影響に着目した風力の評価指標として用いることができる。
- 風力の共振成分は風方向の速度および加速度応答（標準偏差）および風直交方向の変位、速度および加速度応答（標準偏差）に影響するため、風方向速度および加速度と風直交方向変位、速度および加速度に着目した風力の評価には共振成分の評価が重要となる。

本報その2では風応答への影響に着目した風力の共振成分の評価指標の構築方法および検証を示す。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築物荷重指針を活かす設計資料 2—建築物の風応答・風荷重評価/CFD適用ガイド、2017
- 2) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説、2015
- 3) 今野大輔、沖村将大、佐藤大樹、田中英之、曾根孝行、渡井一樹：風洞実験およびCFDの風力を用いた超高層建物の応答比較 その1 気流特性および風力特性の比較、日本建築学会学術講演梗概集、pp.141-142、2023
- 4) 沖村将大、佐藤大樹、田中英之、曾根孝行、渡井一樹、今野大輔：風洞実験およびCFDの風力を用いた超高層建物の応答比較 その2 時刻歴応答解析による応答の比較と分析、日本建築学会学術講演梗概集、pp.143-144、

2023

- 5) 岸田岳士、田村哲郎、野津剛、勝村章、奥田泰雄、溜正俊：LESによる建築物の風荷重評価の実用化検討—風洞実験結果および観測結果との比較—、第22回風工学シンポジウム論文集、pp.293-298、2012
- 6) 平塚紘基、佐藤大樹、田中英之：履歴型ダンパーを有する超高層制振建物の弾塑性風応答予測、日本建築学会技術報告集、第27巻、第66号、pp.662-667、2021.6
- 7) 沖村将大、佐藤大樹、田中英之、曾根孝行、渡井一樹、畔上泰彦：風洞実験およびCFDより得られた風力を用いた超高層建物の時刻歴応答解析 その1 気流性状および風力特性の比較、日本建築学会関東支部研究報告集、1、pp.493-496、2023.2
- 8) 平井宏幸、吉江慶祐、佐藤大樹、鈴木悠也、北村春幸：変動風力を受ける超高層建築物の高次モード応答特性、日本建築学会技術報告集、第18巻、第38号、pp.79-84、2012.2
- 9) 吉江慶祐、大熊武司、北村春幸、和田章：広帯域性の変動風力を受ける弾塑性構造物の応答変位振幅の確立分布、日本建築学会構造系論文集、第604号、pp.37-46、2006.6

謝辞はその2にまとめて示す。

表3 風方向応答の各成分の標準偏差
(a) 準静的成分

	変位 $1\sigma_{DB}$	速度 $1\sigma_{VB}$	加速度 $1\sigma_{AB}$
風洞実験	78.4 (21.0%)	14.4 (0.6%)	5.7 (0.1%)
CFD	132.6 (50.2%)	18.9 (1.5%)	5.2 (0.1%)
荷重指針	56.5 (29.1%)	10.3 (0.9%)	3.0 (0.1%)

(b) 共振成分

	変位 $1\sigma_{DR}$	速度 $1\sigma_{VR}$	加速度 $1\sigma_{AR}$
風洞実験	152.2 (79.0%)	185.5 (99.4%)	234.1 (99.9%)
CFD	132.2 (49.8%)	157.8 (98.5%)	196.5 (99.9%)
荷重指針	88.3 (70.9%)	105.8 (99.1%)	131.8 (99.9%)

* 青字は荷重指針の値より大きい値、赤字は荷重指針の値より小さい値を表す

表4 風直交方向応答の各成分の標準偏差
(a) 準静的成分

	変位 $1\sigma_{DB}$	速度 $1\sigma_{VB}$	加速度 $1\sigma_{AB}$
風洞実験	44.7 (0.7%)	13.0 (0.03%)	13.9 (0.03%)
CFD	58.6 (2.6%)	16.3 (0.2%)	8.9 (0.03%)
荷重指針	23.1 (0.3%)	7.3 (0.02%)	2.6 (0.002%)

(b) 共振成分

	変位 $1\sigma_{DR}$	速度 $1\sigma_{VR}$	加速度 $1\sigma_{AR}$
風洞実験	538.9 (99.3%)	657.7 (99.97%)	816.0 (99.97%)
CFD	359.3 (97.4%)	418.7 (99.8%)	508.2 (99.97%)
荷重指針	376.6 (99.7%)	444.9 (99.97%)	543.8 (99.998%)

* 青字は荷重指針の値より大きい値、赤字は荷重指針の値より小さい値を表す

*1 東京工業大学 大学院生

*2 東京工業大学 科学技術創成研究院 准教授・博士(工学)

*3 株式会社竹中工務店 技術研究所

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology*¹

Associate Prof., IIR, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.*²

Research & Development Institute, Takenaka Corporation.*³