高層建物の風応答予測の不確かさ伝播に関する研究

UNCERTAINTY PROAGATIONS ON WIND RESPONSE ANALYSIS OF TALL BUILDINGS

野田 博*

Hiroshi NODA

In this paper, uncertainty propagation analysis was conducted to investigate accuracy of wind response prediction of high rise buildings and influence of uncertainties in each parameter which are used in wind response analysis. A new parameter which is “related sensitive coefficient” concerning propagation was defined to consider wind response prediction more analytically and efficiently. The values of uncertainties of each parameter were also investigated on the basis of literature. Furthermore, the accuracy of wind response predictions obtained by spectra-modal analysis was revealed from investigation of related sensitive coefficients and values of uncertainties of each parameter.

Regarding the mean and maximum fluctuating response displacement, uncertainties of natural frequency and design wind velocity affect to response results strongly, whereas uncertainties of damping ratio and wind force spectrum affect slightly. The largest values of uncertainties in whole parameter of wind response analysis are uncertainties of damping ratio and wind force spectrum. Minimum value is uncertainty in design wind velocity.

The uncertainty propagation value to the maximum response displacement was the highest for the natural frequency. That is, the uncertainty of the maximum response displacement was largely dependent on the uncertainty of the natural frequency. The damping ratio and the resonance wind force spectrum had high uncertainty. However, their propagation values were low because their relative sensitivity coefficients were low.

Keywords : Wind response analysis, Spectra-modal analysis, Uncertainty, Propagation & combined, Reliability

風応答予測, スペクトルモード解析, 不確かさ, 伝播と合成, 信頼性

1. はじめに

建築物の耐風設計では、応力解析や振動応答解析等を実施し、設定した風荷重レベルにおける部材応力が使用する部材耐力を上回らないことを確認する。このとき、数多くの基準値、実験値あるいは経験値に基づいた値を用いて風荷重レベルや部材応力を算定する。これらの諸量は、種々の原因により「不確かさ」を有している。「不確かさ」とは、多くの分野で一般的に用いられている「誤差」や「精度」に対応するもので、計量・測量分野で統一された計測データの信頼性の表現方法であり、結果に付随したばらつきを特徴つけるパラメーター（真の値が存在する範囲）として用いられる。例えば、耐風設計で重要な解析項目である風応答解析では、種々の建物構造特性、風洞実験結果、あるいは気象観測データに基づく設計風速が用いられるが、これらは全て「不確かさ」を有し、「不確かさ」を有する諸量を用いて風応答解析を行えば、「不確かさ」は伝播され、そ

の解析結果も「不確かさ」を有する。この風応答解析結果の「不確かさ」はどの程度なのか、あるいは解析結果に大きく影響を及ぼすのはどの因子なのかを把握することは、風応答解析結果を耐風設計に適用する場合において大変重要である。

設計資料の信頼性を確認することを目的として、これまで数多くの研究がされている^{例えは 1)~4)}。Pagnini¹⁾は、固有周期と減衰定数のばらつきが風方向振動にどの程度影響しているかを調べている。Pagnini & Solari²⁾は風の乱れの統計量の評価方法により風応答解析に用いる変動風力が大きく異なることを指摘し、変動風のばらつきが建物応答予測にどの程度伝播するかを調べている。その際変動風力は、乱れの統計量を変化させ、モンテカルロ法により生成している。Saranyasoontorn & Manuel³⁾は発電用風車に作用する荷重算定に用いられる風の乱れの統計量モデルのばらつきが、風荷重算定にどの程度影響するかを検討している。その際 POD 解析を利用して風の乱

* 近畿大学建築学部建築学科 教授・博士(工学)

Prof. Dept. of Architecture, Faculty of Architecture, Kindai University

れのばらつきの特性を考察している。Saranyasoonon & Manuel³⁾では、風車設計用風荷重のばらつきは風の乱れのばらつきよりも小さいと結論付けている。平井ら⁴⁾は、風洞実験により得られる1次一般化変動風力のばらつきとその風力を用いた場合の風応答予測値のばらつきを変動係数とアンサンブル平均により検討している。

地震動と建物応答に関しても種々検討されている(例えば^{5)~8)}。桑村ら⁵⁾は、モンテカルロ法により作成した数多くの部材耐力の異なる建物構造骨組の標本を生成し、部材耐力のばらつきが建物骨組の崩壊メカニズムに及ぼす影響を考察している。また地震動のばらつきと建物質量の高さ方向分布のばらつきも同様の手法により検討している。桑村ら⁵⁾では地震動ならびに建物質量の高さ方向分布のばらつきよりも部材耐力のばらつきの方が建物の全体崩壊メカニズムに与える影響が大きいことを示した。宅間ら⁶⁾は建物の固有周期のばらつきが地震動に対する弾性応答スペクトルに与える影響について考察している。加速度応答倍率のばらつきは、建物固有周期のばらつきよりも大きくなることを示した。松尾ら⁷⁾は、建物の各部材の降伏応力のばらつきが建物構造骨組のエネルギー吸収に与える影響について、建物の層数、スパン数、柱梁耐力比を変化させて考察している。各部材の降伏応力はモンテカルロ法により5000個生成している。市橋ら⁸⁾は、地震動の非定常性をより合理的に設計地震動に反映させることを目的とし、種々の時間周波数特性を有する模擬地震波群を合成しこれらの弾塑性系振動モデルの応答値のばらつきを考察している。検討の結果、最大応答変位に大きなばらつきを有することを指摘した。これらの既往の研究では、外力、減衰定数、あるいは固有周期などのある一つの因子のばらつきと建物応答に及ぼす影響の考察が多く、また検討手法はモンテカルロ法を利用して因子のばらつきを再現して数多くの実計算を実施している。

本論文では、風応答解析の信頼性を系統的に検証するため、計測値の信頼性評価^{9),10)}で用いられている不確かさ伝播解析ならびに合成¹¹⁾を風応答解析に応用し、風応答解析で用いる種々のパラメーターの「不確かさ」が解析結果に及ぼす影響を定量的に明らかにする。また、種々のパラメーターの「不確かさ」を既往の文献により調査し、種々のパラメーターの「不確かさ」による応答解析結果の「不確かさ」、あるいはそれらの合計がどの程度かを調べた。

なお、同様な研究として野田ら¹²⁾が風環境評価結果の信頼性に関して検討しているが、本研究はその手法を風応答解析結果の信頼性に適用したものである。

本論文は注1),注2)を加筆・修正したものである。

2. 不確かさの伝播と合成

不確かさを有する種々のパラメーター(以下、因子という。)を用いて評価値を算出するとき、その評価値に含まれる不確かさを求めるには、各因子に含まれる不確かさの見積もりと、各因子の不確かさの伝播と合成を計算すればよい¹¹⁾。不確かさの伝播と合成は以下の手順で算出できる。ある値 x を用いて評価値 $f(x)$ を算出することを考える。ある値 x が有する不確かさ量を δx とすると、評価値の不確かさ量、すなわち不確かさ伝播量 $\delta f(x)$ は下式となる。

$$\delta f(x) = \left| \frac{df(x)}{dx} \right| \delta x \quad (1)$$

右辺の微係数の絶対値は感度係数と呼ばれ、この値により因子の不確かさが増幅あるいは減衰して伝播するか決定する。

複数の因子を x_i ($i=1,2,\dots,N$) とし、これらの不確かさを δx_i とする。複数の因子を用いて評価値 $f(x_i)$ ($i=1,2,\dots,N$)を計算する場合、 x_i が互いに独立かつランダムであるとすれば、 $f(x_i)$ の合成不確かさ $\delta f(x_i)$ は以下の通りとなる。

$$\delta f(x_i) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f(x_i)}{\partial x_i} \delta x_i \right)^2} \quad (2)$$

不確かさ δx_i が独立でなく、互いに相関がある場合には、 $f(x_i)$ の合成不確かさ $\delta f(x_i)$ は以下で求めることが出来る。

$$\delta f(x_i) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f(x_i)}{\partial x_i} \delta x_i \right)^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f(x_i)}{\partial x_i} \frac{\partial f(x_j)}{\partial x_j} \sigma_{i,j}} \quad (3)$$

ここで、 σ_{ij} は x_i と x_j の共分散である。ただし、(3)式は x_i の不確かさ δx_i に標準偏差を用いた場合に成立する。

本研究では風応答解析の不確かさ伝播量を検討する際には、各因子の影響を相対評価しやすいように、各因子の不確かさ伝播量を下式の相対不確かさ伝播量で表す。

$$Ru_{xi} = \frac{\delta f(x_i)}{f(x_i)} = \frac{\left| \partial f(x) / \partial x \right| \delta x_i}{f(x_i)} \quad (4)$$

ここで、 Ru_{xi} は相対不確かさ伝播量である。相対不確かさ伝播量を(4)式で定めると、全ての場合において下式のように整理できる。

$$Ru_{xi} = C_{v_{xi}} \cdot \frac{\delta x_i}{x_i} \quad (5)$$

ここで、 $\delta x_i/x_i$ は因子の相対不確かさ量、 $C_{v_{xi}}$ は相対不確かさ量における感度係数であり相対感度係数と定義する。

このように定義することにより、例えば、「因子Aは、その値に対してa%の不確かさを有するとき、風応答予測値にはその予測値に対して($C_{v_{xi}} \cdot a$)%の不確かさを有する。」と理解することができる。

本論文では、不確かさ量 δx_i として x_i の標準偏差 σ_{xi} を用いる。この場合、不確かさ量は標準不確かさ量となり、相対不確かさ量 $\delta x_i/x_i$ は変動係数(=標準偏差/期待値)に相当する。ただし、建物固有周期と建物減衰定数の不確かさ量については、後述の理由により変動比を用いる。

3. 風応答解析の不確かさの伝播

3.1 対象とする風応答解析

本論文で対象とする風応答解析は、一般的に用いられている線形応答を仮定したスペクトル・モード解析とする。一次振動のみを対象とすれば、最大応答変位、最大応答加速度、ならびに平均変位は以下の通りとなる。

$$y_{\max} = g_p \frac{\sigma_f}{(2\pi n_0)^2 m} \sqrt{1 + \frac{\pi}{4h} \cdot \frac{n_0 S(n_0)}{\sigma_f^2}} \quad (6)$$

$$\ddot{y}_{\max} = g_p \frac{\sigma_f}{m} \sqrt{\frac{\pi}{4h} \cdot \frac{n_0 S(n_0)}{\sigma_f^2}} \quad (7)$$

$$\bar{y} = \frac{C_f \rho U^2 B H}{2(2\pi n_0)^2 m} \quad (8)$$

$$g_p = \sqrt{2 \ln(600 n_0 + 1.2)}, \sigma_f = C_f \cdot \frac{1}{2} \rho U^2 B H \quad (9), (10)$$

ここで、 $y_{\max}$:最大応答変位、 $\ddot{y}_{\max}$:最大応答加速度、 $\bar{y}$:平均変位、 n_0 :建物一次固有振動数、 m :一般化質量、 h :減衰定数、 B, H :それぞれ建物幅と高さ、 U :設計風速、 ρ :空気密度、 $S(n_0)$:一般化変動風力の基準化パワースペクトル密度の一次固有振動数成分、 C_f, C_f' :それぞれ一般化風力の平均風力係数、変動風力係数、である。

(6)式に示すとおり、本論文において最大応答変位とは変動成分のみの最大応答値であり平均成分は含まれていない。

3.2 風力スペクトルのモデル化

一般化変動風力の基準化パワースペクトル密度(以下、風力スペクトル= $F(n)$ とする。)は建築物荷重指針・同解説¹³⁾を参照する。通常の高層建築物では、風力スペクトルの共振成分は風直交方向のピーク振動数($n_0 B/U \approx 0.1$)以上となる。この領域では、風方向・風直交方向共に両対数軸で概ね直線となる。そこで、不確かさ伝播解析を簡便にするために、風力スペクトルを(11)式でモデル化する。

$$\frac{n_0 S(n_0)}{\sigma^2} = F(n_0) = a \left(\frac{n_0 B}{U} \right)^b \quad (11)$$

ここで、 a, b :風力スペクトルの近似係数

不確かさ伝播解析を行う場合には各因子に関する偏微分を行うが、風力スペクトルを簡素化された(11)式で近似することにより偏微分が格段に容易になり、かつ伝播の状況も把握し易くなる。

辺長比($D/B, D$:建物奥行、 B :建物幅)が0.33から2.0の風力スペクトルを Fig.1 に示す。図中には(11)式で $D/B=1$ の場合の近似状況も付記する。(11)式による近似は、風方向、風直交方向共に風直交方向のピーク振動数(≈ 0.1)以上の振動数領域を近似する様に決定した。(11)式は対象とした振動数領域を適切に近似出来るようである。同様に種々の辺長比における風力スペクトルを(11)式で近似した場合の近似係数 a, b の値を Table 1 に示す。対数グラフにおける切片となる近似係数 a は0.0003 から0.0084と値に幅が見られるが、勾配である近似係数 b はほぼ-2.2前後の値となった。

4. 風応答予測値への不確かさ伝播解析

最大応答変位 $y_{\max}$ 、最大応答加速度 $\ddot{y}_{\max}$ 、平均変位 $\bar{y}$ を求める際に用いる各パラメーターを不確かさの因子とし、各因子の不確かさ量が風応答予測値にどの程度伝播するかを解析的に求める。まず、風応答予測式である(6)~(10)式を(1)式に当て嵌めて各因子の伝播量を求める。そして、(4)、(5)式により相対感度係数 $C_{v_{xi}}$ を求め、 $C_{v_{xi}}$ を考察することにより各因子の不確かさが風応答予測値へ伝播する際の増幅あるいは減少の状況を検討する。

対象とする因子は、建物固有周期 n_0 、減衰定数 h 、設計風速 U 、

平均および変動風力係数 C_f, C_f' 、パワースペクトル密度の共振成分 F_L 、計5因子である。検討に際し風応答予測で想定した建物諸元を Table 2 に示す。減衰定数は、文献¹⁴⁾を参照し2%とした。ここで、各因子が変化した場合を考察するために Table 2 に示す因子の値を基準(=1.0)とし、その値から0.5~1.5倍(α_{xi} と定義する。)に変化させた。平均変位、最大応答変位、最大応答加速度の相対感度係数 C_{xi} を Fig.2 に示す。本研究で対象とした因子は概ね互いに無相関と仮定できる。そこで、図中には相対感度係数を(2)式で合成したトータルの相対感度係数 C_{all} も付記する。 C_{all} は、各因子の不確かさ量が同等の場合の不確かさ伝播量に相当する。なお付録には、各因子に関する(1)式の伝播量、相対不確かさ量 Rp_{xi} 、ならびに相対感度係数 C_{xi} の導出を示す。

まず、平均変位について考察する。平均変位では、平均風力係数 C_f の相対感度係数 C_{cf} は何れの α_{cf} においても1.0となり、このことから平均風力係数 C_f の不確かさは、増幅もせず減衰もせず、同じ割合で応答予測値へ伝播することが分かる。また、固有振動数 n_0 (この場合、建物水平剛性ならびに建物質量の平方根)と設計風速 U の相対感度係数 C_{n_0}, C_U は2.0となり、これらの不確かさは2倍に増幅されて平均変位に伝播される。このことから、例えば平均風力係数 C_f の精度よりも設計風速 U の精度が重要であることがわかる。平均変位は α_{xi} の値によらず相対感度係数 $C_{v_{xi}}$ は一定となっている。

Fig.1 Power Spectra Densities of Wind Force

Table 1 Parameter "a" and "b" of Eq.(11)

	D/B	0.33	0.5	1.0	1.5	2.0
Along-wind	a	0.0084	0.0041	0.0012	0.0006	0.0003
	b	-1.89	-2.02	-2.16	-2.18	-2.16
Across-wind	a	0.0080	0.0053	0.0030	0.0023	0.0020
	b	-2.18	-2.30	-2.31	-2.19	-2.06

次に最大応答変位について考察する。最大応答変位の相対感度係数 C_{v_x} は風方向(Fig.2(b)), 風直交方向(Fig.2(c))とも概ね同様な傾向を示している。最大応答変位では、平均変位と同様に変動風力係数 C_f の相対感度係数である C_{cf} は 1.0 で一定である。固有振動数 n_0 と設計風速 U の相対感度係数 C_{n_0} , C_U は α_{n_0} , α_U の値により変化するが 2.0~3.0 の値となり、平均変位の場合よりも増幅が大きい。一方、減衰定数 h と風力スペクトル F の相対感度係数 C_h , C_F は α の値によりわずかに変化するが、ほぼ 0.2 から 0.3 の値となる。このことから、減衰定数 h と風力スペクトル F の不確かさが最大応答変位へ及ぼす影響は、他の因子に対して小さいと言える。

最大応答加速度への伝播は最大応答変位の場合と同様である。ただし固有振動数の相対感度係数 C_{n_0} の異なり、最大応答変位では 2.0~3.0 に増幅していたが、最大応答加速度ではほぼ 1.0 となり伝播の増減はない。

不確かさ伝播の合計量である C_{all} を各応答予測値で比較すると、最大応答変位で大きく、特に風直交方向で最も大きな値となっている。また、いずれの応答予測値においても建物緒元を変化させても (α_{xi} の値を変化させても) 相対感度係数の変化は小さい。

5.各因子の不確かさ量

本章では、各因子の不確かさを既往の研究成果に基づいて定量的に把握する。検討した因子は前章と同様、建物振動数 n_0 (検討では参考文献の都合上固有周期)、減衰定数 h 、設計風速 U 、平均および変動風力係数 C_f , C_f' 、一般化変動風力の風力スペクトル F である。なお、各因子の不確かさ量は、(5)式に代入して風応答予測値への伝播量を計算するため相対不確かさ量($=\delta x_i/x_i$)で表す。

5.1 建物の固有周期の不確かさ

建物固有周期の不確かさ量は文献¹⁵⁾付表により求めた。文献¹⁵⁾付表によれば、S 造、RC 造ならびに SRC 造の固有周期の設計値と実測値の関係は Fig.3 に示すとおりである。文献¹⁵⁾付表では各建物の固有周期の設計値と実測値が長辺方向と短辺方向に分けて整理されているため、本論文でも分けて図化した。建物固有周期は、いずれの構造においても実測値の方が設計値に比べて周期が短い。

建物固有周期の不確かさは設計値と実際の値の差異が対象となる為、ここでは変動係数の代わりに以下の変動比を定義して固有周期の相対不確かさ量とする。

$$\frac{\delta x}{x_{di}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \{x_i - x_{di}\}^2 / x_{di}^2}{N-1}} \quad (12)$$

ここで、 $\delta x/x_{di}$: 変動比、 x_i : 実測値、 x_{di} : 設計値、N: データ数である。

S 造、RC 造の変動比を Table 3 に示す。変動比は、短辺方向、長辺方向毎に文献¹⁵⁾付表の掲載データ全てと建物高さ 60m 以上の場合について求めた。S 造、RC 造ならびに SRC 造の固有周期の変動比は、それぞれ 0.21~0.24, 0.17~0.20, 0.32~0.36 であった。

Table 2 Specifications of study building model

Width(B), Depth(D), Height(H)	B=40m, D=40m, H=120m
1st Natural Frequency	0.3Hz
Damping ratio	2%
Terrain Category	III ($\alpha=0.2$, $I_H=0.139$, $L_H=200m$)
Velocity (at building Height)	45m/s
Mean modal force coefficient (C_i)	0.444(along-wind)
Fluctuating modal force coefficient (C_f)	0.097(along-wind), 0.157(across-wind)

※ Crand C_f are from Ref.13)

Fig. 2 Relative uncertainty coefficients of each factor concerning wind response analysis, (a) Mean response displacement, (b)Max. response displacement (along-wind), (c)Max. response displacement (across-wind), (d)Max. response acceleration (along-wind), (e)Max. response acceleration (across-wind)

5.2 建物の減衰定数の不確かさ

減衰定数の不確かさ量に関しても、文献¹⁵⁾付表を参照した。S造、RC造ならびにSRC造の減衰定数と建物高さの関係をFig.4に示す。減衰定数はいずれの構造物においてもばらつきが大きい。特に建物高さが低い場合に顕著である。減衰定数も設計値と実際の値との差異が対象となる為、減衰定数の相対不確かさ量も(12)式の変動比で定義する。文献¹⁵⁾付録において設計値がない場合、S造では2%、RC造とSRC造では3%とした。Fig.5には下式の1データごとの変動比を建物高さごとに示す。

$$\frac{\delta x_i}{x_{di}} = \left(\frac{x_i - x_{di}}{x_{di}} \right)^2 \quad (13)$$

Fig.5より、変動比のばらつきは、高さによる傾向は少ない。また構造による差異も明確でない。何れの構造においても減衰定数の設計値と実測値の差異は、特異なケースを除いて、変動比にして概ね最大0.5程度の差異がある。

S造、RC造ならびにSRC造の減衰定数の変動比をTable 4に示す。減衰定数の変動比は、設計値を2%あるいは3%とすると、S造で0.51～0.54、RC造で0.51～0.75、SRC造で0.57～0.69となる。

5.3 設計風速の不確かさ

建築物荷重指針・同解説¹³⁾では、局所地形と再現期間の変更が無ければ、設計風速の算出には、基本風速 U_0 、べき指数 α 、境界層高さ Z_G の値が用いられる。従って、通常の設計風速の不確かさ量はこれら3つ値の不確かさ量が関連する。ここで、建築物荷重指針・同解

Fig.3 Relationship of design values and measurements on natural period¹⁵⁾

Fig.4 Damping ratio of measurement values¹⁵⁾

Fig.5 Difference ratios of damping ratio between design values and measurements¹⁵⁾

説¹³⁾で用いられている Z_G は物理的な境界層高さではなく地表面粗度区分を変更する際に便宜的に用いられていること、境界層高さ Z_G の不確かさ量に関して適切な資料がないこと、の理由により本研究では省略する。

基本風速 U_0 の不確かさ量に関しては、石原ら¹⁶⁾によれば 100 年再現期待値の標本誤差の全国平均値は 1.8m/s、100 年再現期待値の全国平均値は 28.4m/s(1961 年～1999 年)である。よって基本風速 U_0 の不確かさ量は $0.06(=1.8/28.4)$ と仮定する。

べき指数 α の不確かさは、Li et.al¹⁷⁾、大塚ら¹⁸⁾の市街地における実測結果を参照した。Li et.al¹⁷⁾の実測では、べき指数 α の平均値は 0.267、標準偏差 0.0375、変動係数 0.14(観測高さ 80m、13m/s 以上の値(データ数 58 個)を使用)、大塚ら¹⁸⁾では、平均値 0.289、標準偏差 0.083、変動係数 0.29(観測高さ 214m、20m/s 以上の値(32 個)を使用)であった。ここで設計風速の算定式¹³⁾ ((14)式)より、べき指数 α の不確かさ量の設計風速 U への相対不確かさ量は(15)式となる。

$$U = U_0 \cdot 1.7 \cdot (H / Z_G)^{\alpha} \quad (14)$$

$$\frac{|\partial U / \partial \alpha|}{U} \delta \alpha = \left| \ln(H / Z_G)^{\alpha} \right| \frac{\delta \alpha}{\alpha} \quad (15)$$

べき指数 α の変動係数 $(\delta \alpha / \alpha)$ を上述の 2 実測^{17),18)}より 0.2 と仮定し、地表面粗度区分 IV($Z_G=450\text{m}$, $\alpha=0.20$)、建物高さ $H=120\text{m}$ とすると、べき指数 α の不確かさ量の設計風速への伝播量、すなわち相対不確かさ((15)式)は 0.05 となる。

基本風速 U_0 とべき指数 α は無相関と仮定すると(2)式の二乗和で合成できる。すなわち基本風速 U_0 の不確かさ量を 0.06、べき指数 α の不確かさ量の設計風速の伝播量を 0.05 とすると設計風速の相対不確かさ量は 0.08 となる。

5.4 風洞実験結果の不確かさ量

変動風力係数、平均風力係数、風力スペクトルは、風洞実験あるいは建築物荷重指針・同解説¹³⁾により求める。ここで、建築物荷重

指針・同解説¹³⁾の値も風洞実験結果に基づいているため、風力に関する各因子の不確かさは全て風洞実験結果の不確かさとする。

風応答予測で用いられる風洞実験結果は、建物全体に作用する転倒モーメントであるが、転倒モーメントの実験値の不確かさに関する適切な資料が無い為、文献¹⁹⁾に示される風圧実験データの不確かさを代用する。文献¹⁹⁾には 7 機関で測定された低層建物(B:D:H=1:1:0.5)に作用する変動風圧係数が比較されている。一例として、屋根面と側面の変動風圧係数を Fig.6 に示す。図中には 7 機関の平均値ならびに標準偏差も付記する。文献¹⁹⁾より、変動風圧係数の変動係数(=標準偏差/平均値)は 0.18～0.31(平均値は 0.24。1/4 勾配流、風向角 0°のデータのみ使用)であった。よって、変動風力係数、平均風力係数の不確かさ量は 0.24 とし、風力の二乗値である風力スペクトルは不確かさ伝播解析に則りその 2 倍の 0.48 とする。

5.5 各因子の不確かさ量の比較

前節までで検討した各因子の相対不確かさ量 $\delta x_i / x_i$ を Table 5 に示す。相対不確かさ量が最も大きいのは減衰定数であり、その値は $\delta h / h = 0.5 \sim 1.7$ 程度となっている。建物の減衰定数は解析的に求めるのは困難であり、設計段階においては通常経験的に設定される。実際の建物減衰定数は種々の要因により決定されるため、実測値においても不確かさが大きい。本研究では他の因子と比較しても減衰定数の不確かさは大きいということが判明した。

次に大きいのは風力スペクトルの不確かさ量であり、本研究の見積もりでは $\delta F / F = 0.48$ となる。風力スペクトルは風力の実験データの自乗値のため不確かさ量も大きくなる。

固有振動数の相対不確かさ量 $\delta n_0 / n_0$ 、平均ならびに変動風力係数の相対不確かさ量 $\delta C_f / C_f$ は、減衰定数ならびに風力スペクトルのそれらと比べて約 1/2 以下の値となる。最も不確かさ量が少ないのは、設計風速であり、本研究では $\delta U / U = 0.08$ となった。設計風速の不確かさ量はあくまでも再現期間 100 年に対する風速値の不確かさであるため、他の因子の相対不確かさ量よりも小さい値となっている。

Table 3 Deviation Ratio of Natural Frequency

Structure	Direction	Deviation Ratio		Number of data	
		Total	Over 60m	Total	Over 60m
Steel	Short Side	0.21	0.21	192	153
	Long side	0.24	0.24	168	139
Reinforced Concrete	Short Side	0.19	0.20	23	19
	Long side	0.17	0.18	22	18
Steel RC	Short Side	0.32	0.32	44	33
	Long side	0.36	0.36	44	33

Table 4 Deviation Ratio of Damping ratio

Structure	Direction	Deviation Ratio (design value, 2 or 3%)		Deviation Ratio (design value, 1% or 1.5%)		Number of data	
		Total	Over 60m	Total	Over 60m	Total	Over 60m
Steel Structure	Short Side	0.51	0.54	0.75	0.71	216	165
	Long side	0.52	0.51	0.79	0.70	184	148
RC Structure	Short Side	0.51	0.52	0.91	0.66	33	20
	Long side	0.75	0.62	1.70	0.87	29	20
Steel RC	Short Side	0.57	0.61	1.19	1.28	72	37
	Long side	0.66	0.69	1.18	0.99	62	37

6. 風応答予測値への不確かさ伝播量

風応答予測値への相対不確かさ伝播量 $R_{p_{xi}}$ を Fig.7 に示す。Fig.7 中には各因子の相対不確かさ伝播量を(2)式で求めた合成値($R_{p_{all}}$)も付記する。風応答解析で想定して建物特性は Table 2 に示す 4 章で検討した値と同じである。また、計算に用いた各因子の相対不確かさは、5 章の結果を参考に Table 5 右欄に示す値を設定した。

まず、平均変位の相対不確かさ伝播量 $R_{p_{xi}}$ について考察する。平均変位への相対不確かさ伝播量は固有振動数に起因する不確かさ伝播量 $R_{p_{no}}$ が最も大きく 0.46 となる。次いで平均風力係数の不確かさ伝播量 $R_{p_{cf}}$ 、設計風速の不確かさ伝播量 $R_{p_{U}}$ の順となっている。固有振動数の相対不確かさ伝播量は他の値に比べて 2 倍以上となっている。3 つの因子による相対不確かさ伝播量の合成値は 0.52 である。

以上より、平均変位の不確かさは固有振動数の不確かさに大きく依存していると言える。これは、固有振動数の相対感度係数 $C_{v_{no}}$ が 2.0 と大きく、かつ相対不確かさ量 $\delta n_0/n_0$ も 0.23 と比較的大きいためと考えられる。

最大応答変位の相対不確かさ伝播量 $R_{p_{xi}}$ は風方向と風直交方向で定量的にも定性的にも概ね同様の傾向を示している。変動風力係数以外は、 α_{xi} の値とともに僅かではあるが値が変化する。ただし、因子間の相対的な伝播量の傾向は何れの α_{xi} においても同様である。最大応答変位の相対不確かさ伝播量で最も大きいのは、平均変位の場合と同様に固有振動数の不確かさ伝播量であり、その値は 0.5~0.63 の値となっている。この値は他の因子による相対不確かさ伝播量の 2~3 倍の値となっている。相対不確かさ伝播量の合成値 $R_{p_{all}}$ は、0.62~0.73 であり、このことから最大応答変位の不確かさは、平均変位と同様に、建物固有周期の不確かさに依存している。ここで、建物固有周期は建物水平剛性と建物質量で決定するため、建物水平剛性と建物質量の不確かさに依存しているとも言える。

他の因子の相対不確かさ伝播量のなかでは、変動風力係数の相対不確かさ量 $R_{p_{cf}}$ が大きく、風力スペクトルの相対不確かさ量 $R_{p_{F}}$ が最も小さい。また、相対不確かさ量が最も大きかった減衰定数の相対不確かさ伝播量 $R_{p_{h}}$ も小さい。これは、4 章で検討した相対感度係数 $C_{v_{F}}$ 、 $C_{v_{h}}$ が小さいためである (Fig.2 (b),(c))。

最大応答加速度では、いずれの因子による相対不確かさ伝播量もほぼ同等の値となる。これは、相対不確かさ量が小さい設計風速では相対感度係数が大きく、相対不確かさ量が大きい減衰定数と風力スペクトルでは、相対感度係数が小さいため、このような結果となった。各因子の相対不確かさ伝播量の合成値 $R_{p_{all}}$ は 0.55 であり、最大応答変位の合成値 (0.62~0.73) より小さい。このことより最大応答変位よりも最大応答加速の不確かさが小さいということがわかる。

7. おわりに

本論文では、風応答解析の信頼性を系統的に検証するため、不確かさ伝播解析ならびに合成を風応答解析に応用し、風応答解析で用いる種々のパラメーター(因子)の不確かさ量の風応答予測値への影響を検討した。検討では、相対感度係数を定義して各因子の相対的影響度を解析的に検討した。また、既往の文献により各因子の不確かさを評価した。更に相対感度係数と各因子の不確かさ量から、風応答予測値への不確かさ伝播量を求め、風応答予測値の不確かさがどの因子に強く影響しているかを検討した。検討の結果をまとめると以下のとおりとなる。

- (1) 平均変位、最大応答変位において、相対感度係数が最も大きい因子、すなわち、風応答予測値へ影響が最も大きい因子は、固有振動数と設計風速である。一方、減衰係数ならびに風力スペクトルの相対感度係数は小さい。
- (2) 最大応答加速度においては、固有振動数の相対感度係数は大き

Fig.6 Distribution of fluctuating pressure coefficients on low-rise building (B:D:H=1:1:0.5)

Table 5 Values of Relative Uncertainty $\delta x_i/x_i$

factor	deviation coefficient or deviation ratio	values used in consideration of $R_{p_{xi}}$
natural frequency	0.17□ 0.36	0.23
damping ratio	0.51□ 1.70	0.53
velocity	0.08	0.08
fluctuations wind force coefficient	0.24	0.24
mean wind force coefficient	0.24	0.24
wind force power spectra	0.48	0.48

- く、減衰定数と風力スペクトルのそれは小さい。これは、平均変位ならびに最大応答変位と同様の性状だが、最大応答変位では大きかった設計風速の相対感度係数は小さい結果となった。
- (3) 各因子の不確かさは減衰係数が最も大きい。次いで風力スペクトルの不確かさが大きく、最も不確か量の小さいのは設計風速であった。
- (4) 各因子の不確か量の平均変位への伝播量は、固有振動数の不確かさ伝播量が最も大きい。すなわち、平均変位の不確かさは、建物水平剛性と建物質量の不確か量が最も影響していることがわかった。
- (5) 最大応答変位への不確かさ伝播量は固有振動数の不確かさ伝播量が大きい。すなわち最大応答変位の不確かさは固有振動数の不確かさに大きく依存している。因子の不確か量が大きかった減衰定数と風力スペクトルは、相対感度係数が小さいため、伝播量としては小さい。
- (6) 最大応答加速度への不確かさ伝播量は、各因子の不確かさが同程度で伝播されている。これは、因子の不確か量が大きいものは相対感度係数が小さく、不確か量が小さいものは相対感度係数が大きいためである。

謝辞

本研究は JSPS 科研費<基盤研究(C) 16K06594>の助成を受けたものです。

参考文献

- 1)Pagnini, L.C.: Model reliability and propagation of frequency and damping uncertainties in the dynamic along-wind response of structures, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.59, pp.211-231, 1996
- 2)Pagnini, L.C. and Solari, G.: Gust buffeting and turbulence uncertainties, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.90, pp.441-459,2002
- 3)Saranyasontorn, K. and Manuel, L.: On the propagation of uncertainty in inflow turbulence to wind turbine loads, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.96, pp.503-523, 2008.5
- 4) 平井宏幸, 吉江慶祐, 佐藤大樹, 片桐純治, 鶴見俊雄, 北村春幸, 大熊武司: 風洞実験より得られた層風力のサンプル数が高層建築物の時刻歴応答評価に及ぼす影響, 日本建築学会技術報告集, 第 18 巻第 39 号, pp.489-494, 2012.6
- 5)桑村仁, 佐々木道夫, 加藤勉: 降伏耐力のばらつきを考慮した全体崩壊メカニズム骨組みの設計, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 401 号, pp.151-162, 1989.7
- 6)宅間真, 隈澤文俊, 中埜良昭, 岡田恒男: 構造特性のばらつきが地震応答量に与える影響に関する研究—その 1 弾性周期の変動と応答スペクトルの関係—, 構造工学論文集, Vol.41B, pp.165-170, 1995.3
- 7)松尾真太郎, 岡田忠義, 半谷公司, 菅野良一: 降伏応力のばらつきを考慮した鋼構造骨組みのエネルギー吸収性能に関する考察, 日本建築学会構造系論文集, 第 77 巻第 672 号, pp.273-281, 2012.2
- 8)市橋一郎, 曾根彰, 増田新, 野間樹木: 実地震動の時間周波数特性を有す

Fig.7 Propagation value of relative uncertainty on response analysis on (a) Mean response displacement, (b)Max. response displacement (along-wind), (c)Max. response displacement (across-wind), (d)Max. response acceleration (along-wind), (e)Max. response acceleration (across-wind)

る模擬地震波による弾塑性履歴系の最大応答量のばらつきに関する検討、
構造工学論文集, Vol.58B, pp.105-116, 2012.3

9) Bell, S.: Measurement Good Practice Guide No.11(Issue2), A Beginner's Guide to
Uncertainty of Measurement, National Physical Laboratory, 2001.3
(https://www.wmo.int/pages/prog/gcos/documents/gruanmanuals/UK_NPL/mgpg11.pdf, 参照 2016.9.13)

10) 独立行政法人 製品評価技術基盤機構 認定センター：不確かさの入門ガイド、2014.5 (<http://www.nite.go.jp/data/000050641.pdf>, 参照 2016.9.13)

11) John R. Taylor(林茂雄, 馬場涼訳)：計測における誤差解析入門, 東京化学同人, 2000.3

12) 野田博, 丸川比佐夫：風環境評価の“ばらつき”に関する考察, 日本風工学
会誌, 第30巻第3号, pp.338-346, 2005

13) 日本建築学会編：建築物荷重指針・同解説, 丸善出版, 2015

14) 日本建築センター編：評定・評価を踏まえた高層建築物の構造設計実務,
日本建築センター, 2015

15) 日本建築学会編：建築物の減衰, 丸善, 2000

16) 石原孟, 日比一喜, 加藤央之, 大竹和夫, 松井正宏：日本各地の年最大風
速データベースの構築と測器補正, 日本風工学会誌第92号, pp.5-14, 2002.7

17) Li, O.S., Zhi, L., Hu, F.: Boundary layer wind structure from observations on a
325m tower, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.98,
pp.818-832, 2010

18) 大塚清敏, 後藤暁, 川口彰久：小型ドップラーライダー観測による境界層
の風の日変化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1 分冊, pp.93-94,
2010.9

19) 日本建築学会耐風小委員会編：流体計算と風荷重評価シンポジウム資料,
日本建築学会, 1994.11

注

注 1) 野田博：風応答解析の不確かさに関する研究, 日本建築学会大会学術講
演梗概集, B-1 分冊, pp.197-198, 2013.8

注 2) 野田博：風応答解析の不確かさに関する研究 その2 各因子の不確か
さ量と伝播量, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1 分冊, pp.151-152,
2014.9

付録 各因子の不確かさ伝播量と伝播係数

本文で算出した各因子の最大応答加速度, 最大応答変位, 平均変
位, 変動風力の標準偏差, ピークファクターへの不確かさ伝播量の
感度係数 $\partial f(x_i) / \partial x_i$, 相対不確かさ伝播量 Ru_{xi} , 相対感度係数 Cv_{xi}
を示す。相対感度係数 Cv_{xi} は, 相対不確かさ伝播量の算定式の左辺
中二重下線で示す。なお, 一般化風力のパワースペクトル密度(風力
スペクトル)は本文(11)式を参照されたい。

付録 1. 最大応答加速度への不確かさ伝播解析

1) ピークファクター； g_p

$$\frac{\partial \ddot{y}_{\max}}{\partial g_p} = \frac{\sigma_f}{m} \sqrt{\frac{\pi}{4h} \cdot \frac{n_0 S(n_0)}{\sigma_f^2}} = \frac{\ddot{y}_{\max}}{g_p} \quad (a1)$$

$$Ru_{gp} = \frac{|\partial \ddot{y}_{\max} / \partial g_p| \delta g_p}{\ddot{y}_{\max}} = 1 \cdot \frac{\delta g}{g_p} \quad (a2)$$

2) 変動風力の標準偏差； σ_f

$$\frac{\partial \ddot{y}_{\max}}{\partial \sigma_f} = \frac{g_p}{m} \sqrt{\frac{\pi}{4h} \cdot \frac{n_0 S(n_0)}{\sigma_f^2}} = \frac{\ddot{y}_{\max}}{\sigma_f} \quad (a3)$$

$$Ru_{\sigma f} = \frac{|\partial \ddot{y}_{\max} / \partial \sigma_f| \delta \sigma_f}{\ddot{y}_{\max}} = 1 \cdot \frac{\delta \sigma_f}{\sigma_f} \quad (a4)$$

3) パワースペクトル密度の共振成分； $F_{(n0)}$

$$\frac{\partial \ddot{y}_{\max}}{\partial F_{(n0)}} = \frac{1}{2} g_p \frac{\sigma_f}{m} \sqrt{\frac{\pi}{4h} \cdot \frac{1}{F_{(n0)}}} = \frac{1}{2} \frac{\ddot{y}_{\max}}{F_{(n0)}} \quad (a5)$$

$$Ru_{FL} = \frac{|\partial \ddot{y}_{\max} / \partial F_{(n0)}| \delta F_{(n0)}}{\ddot{y}_{\max}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\delta F_{(n0)}}{F_{(n0)}} \quad (a6)$$

4) 減衰定数； h

$$\frac{\partial \ddot{y}_{\max}}{\partial h} = -\frac{1}{2} g_p \frac{\sigma_f}{m} \sqrt{\frac{\pi}{4h} \cdot \frac{n_0 S(n_0)}{\sigma_f^2}} \cdot \frac{1}{h} = -\frac{1}{2} \frac{\ddot{y}_{\max}}{h} \quad (a7)$$

$$Ru_h = \frac{|\partial \ddot{y}_{\max} / \partial h| \delta h}{\ddot{y}_{\max}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\delta h}{h} \quad (a8)$$

5) 固有振動数； n_0

$$\frac{\partial \ddot{y}_{\max}}{\partial n_0} = (2 \ln(600 n_0) + 1.2)^{1/2} \frac{\sigma_f}{m} \sqrt{\frac{\pi}{4h} a \left(\frac{n_0 B}{U} \right)^b} \cdot \left\{ (2 \ln(600 n_0) + 1.2)^{-1} + \frac{1}{2} b \right\} \cdot \frac{1}{n_0} \quad (a9)$$

$$Ru_{n0} = \frac{|\partial \ddot{y}_{\max} / \partial n_0| \delta n_0}{\ddot{y}_{\max}} = \left\{ (2 \ln(600 n_0) + 1.2)^{-1} + \frac{1}{2} b \right\} \cdot \frac{\delta n_0}{n_0} \quad (a10)$$

6) 設計風速； U

$$\frac{\partial a_{\max}}{\partial U} = \left(2 - \frac{1}{2} \beta \right) \cdot g_p \cdot \frac{\sigma_f}{m} \sqrt{\frac{\pi}{4h} a \left(\frac{n_0 B}{U} \right)^b} \cdot \frac{1}{U} \quad (a11)$$

$$Rp_U = \frac{|\partial a_{\max} / \partial U| \delta U}{a_{\max}} = \left\{ 2 - \frac{1}{2} \beta \right\} \cdot \frac{\delta U}{U} \quad (a12)$$

付録 2. 最大応答変位への不確かさ伝播解析

1) ピークファクター； g_p

$$\frac{\partial y_{\max}}{\partial g_p} = \frac{\sigma_f}{k} \sqrt{1 + \frac{\pi}{4h} \cdot \frac{n_0 S(n_0)}{\sigma_f^2}} = \frac{y_{\max}}{g_p} \quad (a13)$$

$$Rp_{gp} = \frac{|\partial y_{\max} / \partial g_p| \delta g_p}{y_{\max}} = 1 \cdot \frac{\delta g}{g_p} \quad (a14)$$

2) 変動風力の標準偏差； σ_f

$$\frac{\partial y_{\max}}{\partial \sigma_f} = g_p \frac{1}{k} \sqrt{1 + \frac{\pi}{4h} \cdot \frac{n_0 S(n_0)}{\sigma_f^2}} = \frac{y_{\max}}{\sigma_f} \quad (a15)$$

$$Rp_{\sigma f} = \frac{|\partial y_{\max} / \partial \sigma_f| \delta \sigma_f}{y_{\max}} = 1 \cdot \frac{\delta \sigma_f}{\sigma_f} \quad (\text{a16})$$

3) パワースペクトル密度の共振成分； $F_{(n0)}$

$$\frac{\partial y_{\max}}{\partial F_{(n0)}} = \frac{1}{2} \frac{\pi}{4h} \frac{1}{\left(1 + \frac{\pi}{4h} F_{(n0)}\right)} y_{\max} \quad (\text{a17})$$

$$Rp_F = \frac{|\partial y_{\max} / \partial F_{(n0)}| \delta F_{(n0)}}{x_{\max}} = \frac{\pi}{8h / F_{(n0)} + 2\pi} \cdot \frac{\delta F_{(n0)}}{F_{(n0)}} \quad (\text{a18})$$

4) 減衰定数； h

$$\frac{\partial y_{\max}}{\partial h} = -\frac{1}{2} g_p \frac{\sigma_f}{k} \sqrt{1 + \frac{\pi}{4h} F_{(n0)}} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\pi}{4h} F_{(n0)}\right)} \left(\frac{\pi}{4h} F_{(n0)}\right) \cdot \frac{1}{h} \quad (\text{a19})$$

$$Rp_h = \frac{|\partial y_{\max} / \partial h| \delta h}{y_{\max}} = \frac{\pi \cdot F_{(n0)}}{8h + 2\pi F_{(n0)}} \cdot \frac{\delta h}{h} \quad (\text{a20})$$

5) 固有振動数； n_0

$$\frac{\partial y_{\max}}{\partial n_0} = \frac{1}{n_0} \cdot g_p \frac{\sigma_f}{(2\pi n_0)^2 m} \sqrt{1 + \frac{\pi}{4h} a \left(\frac{n_0 B}{U}\right)^b} \cdot \left[(2 \ln(600 n_0) + 1.2)^{-1} - 2 + \pi a b \left(\frac{n_0 B}{U}\right)^b \left\{ 8h + 2\pi a \left(\frac{n_0 B}{U}\right)^b \right\}^{-1} \right] \quad (\text{a21})$$

$$Rp_{n0} = \frac{|\partial y_{\max} / \partial n_0| \delta n_0}{y_{\max}} = \frac{\left[(2 \ln(600 n_0) + 1.2)^{-1} - 2 + \pi a b \left(\frac{n_0 B}{U}\right)^b \left\{ 8h + 2\pi a \left(\frac{n_0 B}{U}\right)^b \right\}^{-1} \right] \cdot \frac{\delta n_0}{n_0}}{\quad} \quad (\text{a22})$$

6) 設計風速； U

$$\frac{\partial y_{\max}}{\partial U} = g_p \frac{\sigma_f}{(2\pi n_0)^2 m} \sqrt{1 + \frac{\pi}{4h} a \left(\frac{n_0 B}{U}\right)^b} \cdot \left[2 - \pi a b \left(\frac{n_0 B}{U}\right)^b \left\{ 8h + 2\pi a \left(\frac{n_0 B}{U}\right)^b \right\}^{-1} \right] \frac{1}{U} \quad (\text{a23})$$

$$Ru_U = \frac{|\partial x_{\max} / \partial U| \delta U}{x_{\max}} = \frac{\left[2 - \pi a b \left(\frac{n_0 B}{U}\right)^b \left\{ 8h + 2\pi a \left(\frac{n_0 B}{U}\right)^b \right\}^{-1} \right] \cdot \frac{\delta U}{U}}{\quad} \quad (\text{a24})$$

付録 3. 平均変位への不確かさ伝播解析

1) 平均風力係数

$$\frac{\partial \bar{y}}{\partial \bar{C}_f} = \frac{1}{2} \rho U^2 \cdot \frac{1}{k} = \frac{\bar{y}}{\bar{C}_f} \quad (\text{a25})$$

$$Ru_{Cf} = \frac{|\partial \bar{y} / \partial \bar{C}_f| \delta \bar{C}_f}{\bar{y}} = 1 \cdot \frac{\delta \bar{C}_f}{\bar{C}_f} \quad (\text{a26})$$

2) 固有振動数

$$\frac{\partial \bar{y}}{\partial n_0} = -2 \cdot \bar{C}_f \frac{1}{2} \rho U^2 \cdot \frac{1}{(2\pi)^2 n_0^3 m} = -2 \frac{\bar{y}}{n_0} \quad (\text{a27})$$

$$Ru_{n0} = \frac{|\partial \bar{y} / \partial n_0| \delta n_0}{\bar{y}} = 2 \cdot \frac{\delta n_0}{n} \quad (\text{a28})$$

3) 設計風速

$$\frac{\partial \bar{y}}{\partial U} = 2 \cdot \bar{C}_f \frac{1}{2} \rho U \cdot \frac{1}{k} = 2 \frac{\bar{y}}{U} \quad (\text{a29})$$

$$Ru_U = \frac{|\partial \bar{y} / \partial U| \delta U}{\bar{y}} = 2 \cdot \frac{\delta U}{U} \quad (\text{a20})$$

付録 4. 変動風力の標準偏差への不確かさ伝播解析

1) 変動風力係数

$$\frac{\partial \sigma_f}{\partial C_{f'}} = \frac{1}{2} \rho U^2 = \frac{\sigma_f}{C_{f'}} \quad (\text{a31})$$

$$Ru_{Cf} = \frac{|\partial \sigma_f / \partial C_{f'}| \delta C_{f'}}{\sigma_f} = 1 \cdot \frac{\delta C_{f'}}{C_{f'}} \quad (\text{a32})$$

2) 設計風速

$$\frac{\partial \sigma_f}{\partial U} = 2 \frac{1}{2} C_{f'} \rho U = 2 \frac{\sigma_f}{U} \quad (\text{a33})$$

$$Ru_U = \frac{|\partial \sigma_f / \partial U| \delta U}{\sigma_f} = 2 \cdot \frac{\delta U}{U} \quad (\text{a34})$$

付録 5. ピークファクターへの不確かさ伝播解析

1) 固有振動数

$$\frac{\partial g_p}{\partial n_0} = \frac{\sqrt{2 \ln(600 n_0) + 1.2}}{2 \ln(600 n_0) + 1.2} \frac{1}{n_0} = \frac{g_p}{g_p^2} \frac{1}{n_0} \quad (\text{a35})$$

$$Ru_{n0} = \frac{|\partial g_p / \partial n_0| \delta n_0}{g_p} = \frac{1}{g_p^2} \cdot \frac{\delta n_0}{n_0} \quad (\text{a36})$$

*Hiroshi NODA**

* Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Architecture, Kindai University

In this paper, uncertainty propagation analysis was applied to investigate accuracy of wind response prediction of high raise buildings and influence of uncertainties in each parameter used in wind response analysis. A new parameter which is “related sensitivity coefficient” concerning propagation was defined to consider wind response prediction more analytically and efficiently. The values of uncertainties of each parameter were also investigated on the basis of prior literature. Furthermore, the accuracy of wind response predictions calculated by spectra-modal analysis was revealed from investigation of related sensitivity coefficients and values of uncertainties of each parameter.

The following conclusions can be drawn from this study.

- 1) Regarding the mean and maximum response displacements, the natural frequency and design wind speed had the largest influence exerted by any factor on the wind response predictive value. On the contrary, the relative sensitivity coefficient was low for the damping ratio as well as the resonance wind force spectrum (i.e., resonance component of the wind power spectrum density of the fluctuating wind force).
- 2) Regarding the maximum response acceleration, the relative sensitivity coefficient was high for the natural frequency and low for the damping ratio and the resonance wind force spectrum. It had the same characteristics with the mean response displacement. However, the design wind speed with high sensitivity in the maximum response displacement had low sensitivity for the maximum response acceleration.
- 3) The damping ratio had the highest uncertainty value for any factor. The resonance wind force spectrum had the next highest uncertainty value. The lowest uncertainty value was the design wind speed.
- 4) The uncertainty propagation value to the mean response displacement was larger for the natural frequency than any other factor. That is, the uncertainty of the mean response displacement was affected by the uncertainty of the building’s horizontal stiffness and mass.
- 5) The uncertainty propagation value to the maximum response displacement was the highest for the natural frequency. That is, the uncertainty of the maximum response displacement was largely dependent on the uncertainty of the natural frequency. The damping ratio and the resonance wind force spectrum had high uncertainty. However, their propagation values were low because their relative sensitivity coefficients were low.
- 6) The uncertainty propagation value to the maximum response acceleration was similar for all factors because the relative sensitivity coefficient was low, where the uncertainty of factors was high, and the relative sensitivity coefficient was high, where the uncertainty of factors was low.

(2016 年 5 月 30 日原稿受理, 2016 年 9 月 2 日採用決定)