すべての部材の準静的な最大荷重効果を同時に再現するユニバーサルな
等価静的風荷重算定の試みUNIVERSAL WIND LOAD DISTRIBUTION REPRODUCING THE MAXIMUM
QUASI-STATIC WIND LOAD EFFECTS FOR ALL MEMBERS勝村 章^{*1}, 田村幸雄^{*2}, 中村 修^{*3}

Akira KATSUMURA, Yukio TAMURA and Osamu NAKAMURA

This paper discusses equivalent static wind load that reproduces the maximum load effect on structural members. Current methods for estimating equivalent static wind load are mainly aimed at a certain load effect on a structural member or wind force. In practical design, innumerable maximum load effects can be considered. Therefore, strictly speaking, innumerable equivalent static wind loads also have to be considered for each of these load effects. In this study, the equivalent static wind load that reproduces maximum load effects is shown by a combination of the eigen modes calculated by POD analysis to the fluctuating wind pressure. Applying a singular value decomposition to a matrix of eigen modes by the influence function optimizes the equivalent static wind load combination. This method is applied to large cantilevered roof models. The maximum load effects for bending moment and shear force are focused to estimate the equivalent static wind load. The solution shows the equivalent static wind load that simultaneously reproduces both maximum shear force and maximum bending moment for all structural members.

Keywords: *Equivalent static wind load, Maximum load effect, Proper orthogonal decomposition, Singular value decomposition, Cantilevered roof*

等価静的風荷重, 最大荷重効果, POD解析, 特異値分解, 片持ち屋根

1. はじめに

大空間を有する建築物では, 屋根の軽量化および大スパン化が不可欠であり, それに伴い風に対する動的挙動を把握することが設計上重要となる。現在, 構造骨組用の水平風荷重や屋根風荷重の算定法の1つであるガスト影響係数法は, 建築基準法¹⁾や建築物荷重指針²⁾をはじめ各国の国の基・規準類に取り入れられている。一般的な矩形平面を有する屋根構造物では, 梁の端部や中央部の最大変位や最大応力など, 設計上最も重要となる部分の最大荷重効果に着目し, ガスト影響係数法により等価静的風荷重の算定がなされている³⁻⁵⁾。しかし, 設計用風荷重の分布は平均風圧分布に相似な形で与えられており, 実際に最大荷重効果を生じさせる荷重分布とは大きく異なっており, かつ, 対象としている部材の最大荷重効果以外の荷重効果については, 適切な設計用風荷重となっている保証はない。

近年, 合理的に風荷重を算定する手法がいくつか提案されている。Kasperski & Niemann^{6,7)}は, ある部材の特定の荷重効果に着目した, 準静的な最大荷重効果を生じさせる等価静的荷重分布の算定式を提案した。この算定式では, 風荷重と荷重効果との相関を用いることから, LRC法 (Load Response Correlation Method) と呼ばれている。Holmes^{8,9)}はこの手法を拡張し, 準静的成分と共振成分を組み合わせ

ることができるように定式化した。

田村, 菊池ら¹⁰⁻¹²⁾は低層建物の風力や軸応力などによる最大荷重効果に着目して, これらを生じさせる真の風荷重分布を実験的に検討した。田村, 菊池らは, 着目する部材や風力の最大荷重効果を生じさせる瞬間的な風荷重分布をアンサンブル平均することによって真の風荷重分布を得ている。LRC法の精度に関しても Tamura et al.¹²⁾の詳細な検討があり, ある特殊なケースを除いて, その最大荷重効果を生じさせる真の最大風荷重分布のアンサンブル平均と等しくなることが示されている。また, 風方向風力, 風直交方向風力や振れモーメントなどの各風力成分の相関に注目し, 風力の組み合わせによる荷重効果を考える必要性を示した。

2. ユニバーサルな等価静的風荷重分布の概念

風による構造物の応答は時間的にも空間的にも変化しており, 構造物を支える各部材に生じる最大荷重効果は必ずしも同時に発生することはない。従来の等価静的風荷重とは, ある特定の最大荷重効果に着目し, これを生じさせる静的な荷重分布を定めるものであった。

Davenport¹³⁾が最大応答変位に着目したガスト影響係数法を提案

^{*1} ㈱風工学研究所 主任研究員・工修

^{*2} 東京工芸大学工学部建築学科 教授・工博

^{*3} ㈱風工学研究所 所長・工博

Senior Researcher, Wind Engineering Institute Co., Ltd., M. Eng.
Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Tokyo Polytechnic Univ.,
Dr. Eng.
President, Wind Engineering Institute Co., Ltd., Dr. Eng.

して以来、構造骨組の設計法としてガスト影響係数法は広く用いられてきた。最近の研究では田村ら³⁻⁵⁾、Yin, Kareem ら¹⁴⁾、そして Solari ら¹⁵⁾などが、設計上重要となる最大荷重効果に着目したガスト影響係数法を提案している。しかし、ガスト影響係数法は、等価静的風荷重が平均風荷重に準ずる分布と相似であるという仮定から導かれており、その適用は限定される。

一方、LRC 法は、着目する荷重効果に対し、真の等価静的風荷重分布を与えることができ、現在、Australian/New Zealand Standard¹⁶⁾の、高層建物の設計用風荷重の算定にこの手法が取り入れられている。しかし、LRC 法もガスト影響係数法と同様に、基本的に1つの最大荷重効果にしか着目することができない。

実際の建造物の設計では、厳密には各部材の最大応力などが必要であり、考えるべき部材応力等の最大荷重効果は無数にある。したがって、対象とする部材応力や風力などによる荷重効果または風向の組み合わせにより何通りもの風荷重が設定されなければならず、すべての部材に対して合理的な等価静的風荷重を想定するのは非常に困難な作業である。

一方ではコンピューターの高速化に伴い、数千部材の建物を直接モデル化し、応答解析を行なうことが可能となってきた¹⁷⁾。しかし、風応答解析は地震応答解析とは異なり、継続時間が長く、時刻歴解析には膨大な手間と時間が必要とされる。時刻歴解析により得られる真の最大荷重効果は、設計用風荷重による最大荷重効果のチェックとして用いられることが多いが、設計に合理的に反映されているとは言い難い。特に骨組み等に変更のあることは実務の常であり、その都度時刻歴応答解析をやり直すことは殆どなされない。そこで、最初の段階ですべての部材の最大荷重効果を生じさせる様なユニバーサルな風荷重分布が求められていると、多少の設計変更に対してその風荷重分布によって変更部材の最大荷重効果が概ね再現できる可能性がある。このような風荷重分布についてはこれまで試みがなく、どの様なものになるか未知であるが、種々の架構形式や建物形式に対してユニバーサルな風荷重分布を算定し、資料を蓄積することによって、より合理的な設計用風荷重分布を風荷重基準や指針などで提示できる可能性がある。

このような主旨から、本研究では、新しい試みとして、多数の最大荷重効果を同時に再現できるユニバーサルな等価静的荷重分布の算定法を提案するものである。

本研究で示すユニバーサルな等価静的風荷重分布は、次のような特徴を有する。

- (1) 時刻歴解析により得られるすべての部材の真の最大荷重効果に着目し、それらを同時に再現させる。
- (2) 等価静的風荷重分布を、ある荷重分布の重ね合わせにより表現する。
- (3) 各部材について複数の種類の最大荷重効果（ここでは、せん断力および曲げモーメント）を同時に再現することもできる。

本手法はどのような建物にでも適用でき、任意の最大荷重効果を選択することができる。また、種々の形状の建築物に対して、いくつか典型的な架構形式の建造物の部材の曲げモーメントやせん断力などの最大荷重効果に対するユニバーサルな風荷重分布をデータベース化してゆくと、現在の平均風圧分布に基づく風圧・風力係数分布や、LRC 法によるものよりも、有力な設計ツールとなると思われる。

本研究では、最初の試みとして、大スパン片持ち屋根を解析例として取り上げ、準静的成分（平均値＋非共振成分）による最大荷重効果に焦点をおいて、ユニバーサルな風荷重分布を検討する。

3. 解析手法

ユニバーサルな等価静的風荷重と最大荷重効果の関係を離散的な構造モデルを用いて説明する。点 i に静的荷重 f_i が作用したとき、ある特定の荷重効果 r は、影響関数 I_{ri} により次式のように表せる。

$$r = I_{ri} f_i \quad (1)$$

ここに、 I_{ri} は点 i に単位荷重が作用したときの荷重効果 r に対する影響関数である。一例として、片持ち梁上の点 s における曲げモーメントに対する影響線（影響関数）を図1に示す。0 から X の間に単位荷重が作用するときの点 s の曲げモーメントは0であり、 X から L の間で増加し、先端に作用するとき最も大きくなる。任意の点

図1 点 s における曲げモーメントの影響線

i に荷重が作用するとき、点 s における荷重効果 r は、式(1)の重ね合わせとして表すことができる。

最大荷重効果 $\hat{r}$ と、それを生じさせる等価静的荷重 $\{\hat{F}\}$ が得られているとすれば、それらの関係は次式のように表せる。

$$\hat{r} = \sum_i I_{ri} \hat{f}_i = \{I_r\}^T \{\hat{F}\} \quad (2)$$

本来、等価静的風荷重は、対象とする全ての部材に対する最大荷重効果 $\{\hat{R}\}$ に対して合理的に設定されることが望ましい。そこで、そのような等価静的風荷重 $\{\hat{F}\}$ と、それにより生じる複数の最大荷重効果 $\{\hat{R}\}$ の関係を次式のように表す。

$$\{\hat{R}\} = [I_R] \{\hat{F}\} \quad (3)$$

ここに、 $[I_R]$ は影響関数マトリクスである。今、等価静的風荷重 $\{\hat{F}\}$ を、次式に示すようにある荷重分布 $\{f\}$ の線形和で表すこととする。

$$\{\hat{F}\} = c_1 \{f_1\} + c_2 \{f_2\} + \dots = [F] \{C\} \quad (4)$$

ここで、係数ベクトル $\{C\}$ は、ある荷重分布 $[F]$ が等価静的風荷重を表すときの倍率である。ある荷重分布 $[F]$ は任意の関数を考えることができる。ここでは、変動風圧分布を POD 解析して得られるノルム1の規準モード $[\Phi]$ を採用する。この理由は、(1) POD による規準モードが直交関数であり式(4)に適していること、(2) POD 解析により求められる規準モードのような物理的に意味のある分布を用いることで、準静的な最大荷重効果が効率的に表せるのではないかとこの予想に基づくものである。田村ら¹⁸⁾は、POD 解析により得られる規準座標と規準モードを用いて時刻歴解析を試みた。その結果、応答変位はいくつかの低次モードの規準座標による寄与が卓越していることを明らかにしている。

式(4)を式(3)へ代入し、整理すると次式を得る。

$$\{\hat{R}\} = [I_R][\Phi]\{C\} = [R_0]\{C\} \quad (5)$$

ここに、マトリクス $[R_0]$ は、影響関数と規準モードの積である。式(5)の代数方程式において、マトリクス $[R_0]$ が正則で逆マトリクスが存在するならば、式(5)の解 $\{C\}$ は一意に定まる。未知数が連立方程式より多ければいくつかの解の組み合わせが存在する。また、未知数が連立方程式より少ない場合、厳密解を得ることはできない。

風洞実験において建物に作用する N 点の変動風圧データが得られた場合、計算される共分散マトリクスは $N \times N$ となる。通常、対象とされる最大荷重効果の数 M は、風圧測定点数 N より多く、マトリクス $[R_0]$ は特異行列となり、式(5)を直接解くことができない。そこで、特異値分解により $[R_0]$ を次式に示すように列正規直交行列 $[U]$ および正規直交行列 $[V]$ と、特異値 $[S]$ に分解する。

$$[R_0(M, N)] = [U(M, N)][S(N, N)][V(N, N)]^T \quad (6)$$

ここに、着目する荷重効果の数を M 、荷重の載荷点数 N をとし、括弧内にそれぞれ行および列として示す。式(6)を式(5)へ代入し、整理すれば、係数ベクトル $\{C\}$ は次式のように導かれる。

$$\{C\} = [V][S]^{-1}[U]^T\{\hat{R}\} \quad (7)$$

これより、 M の最大荷重効果 $\{\hat{R}\}$ を N の荷重分布の重ね合わせにより表現することができる。係数ベクトル $\{C\}$ は、式(5)に対する最小2乗の意味での近似解として求められる。

4. 大スパン片持ち屋根の最大荷重効果の算定

4.1 風洞実験

大規模な建物モデルに対し、本手法を適用する。大スパン片持ち屋根を対象とし、風洞実験により、屋根に作用する変動風圧を測定した。風圧模型は、図2に示すように屋根の幅 $W=0.24\text{m}$ 、スパン $D=0.18\text{m}$ および高さ $H=0.18\text{m}$ であり、幾何学的スケールは1/400である。屋根には 5° の傾斜を設けた。風圧測定点は表、裏各48点ずつ、荷重の負担面積が等しくなるように格子状に配置し、変動風圧を96点同時に測定した。データは1kHzで147,456個サンプリングした。

風洞実験は東京工芸大学・風工学研究センターのエッフェル型境界層風洞（幅2.2m、高さ1.8m、境界層形成長さ19m）で行った。実験気流は、平均風速の鉛直分布のべき指数が0.2、屋根平均高さでの乱れの強さが14%である。実験風速は屋根平均高さでおおよそ9m/sとした。

4.2 風力特性

屋根に作用する変動風圧から、表と裏の対応する位置での風圧力の合力として各点の風力を求めた。風力は、屋根を下向きに作用する方向を正と定義する。屋根の平均風力係数分布および変動風力分布を図3に示す。屋根の風上端部では流れが剥離し、平均風力係数の絶対値が大きくなっている。風力の絶対値は風下に向かって急激に減少し、風下端部では風力が屋根を押下げる（正）方向に作用している。屋根風上

図2 風圧モデル（スケール：1/400）

図3 風力係数分布

図4 片持ち屋根のPOD解析による規準モード

隅角部では中央部と比べて、若干、平均風力係数の絶対値が小さくなっている。一方、変動風力係数は、屋根風上中央部に比べて隅角部の方が大きな値を示しており、屋根風上隅角部付近では3次元的な流れが生じていることが推測される。

屋根の変動風力データに対しPOD解析を行なった。POD解析による規準モードのうち、後に示す解析で等価静的風荷重に対して寄与する割合の比較の大きかったものを図4に示す。1次規準モードは変動風力係数と似た形状をしている。(c)5次および(e)10次モード以外は屋根風上先端に特徴のある分布を示している。(f)18次モードは左右が逆対称の分布を示す。(b)および(e)の規準モードの分布は左右の対称性が崩れており、若干実験精度に問題が残るが、本論文の主旨とは無関係であるため、ここでは議論の対象から除く。

4.3 構造モデル

屋根に作用する変動風力により屋根を構成する各部材の荷重効果を算定するため、屋根構造モデルを設定する。屋根構造モデルは、等間隔に配置した8つの梁で構成し、各梁は7つの節点および6つの線要素から成る。屋根解析モデルの節点と風圧測定点は同位置とした。隣接する梁どうしをつなぐ接合条件は、図5に示すように2種類を想定し、ピン接合としたものをモデル1、剛接合としたものをモデル2とする。構造モデルには仮想の固定端を設け、風圧模型の支柱は構造モデルから除いた。設計風速は屋根の平均高さで50m/sとする。

4.4 時刻歴応答解析による最大荷重効果の算定

風洞実験により得られた変動風力を屋根構造モデルの各接合点に作用させ、すべての部材の準静的な応力の時刻歴解析を行った。対象とした片持ち屋根は、荷重の伝達が主に曲げモーメントとせん断力により行なわれ、部材軸力や振りモーメントは無視できる。したがって、ここでは屋根を構成するすべての部材の曲げモーメントとせん断力による荷重効果に着目した。各部材の最大荷重効果 $\{R\}$ は、10分間の最大および最小値の、18個サンプルによるアンサンブル平均で評価した。なお、本解析で用いる各部材の最大荷重効果は、絶対値の最大値から平均値を除いた変動成分のみを用いた。

5. ユニバーサルな等価静的風荷重の解析

5.1 全部材の最大せん断力を同時に再現するユニバーサルな等価静的風荷重

図6に全部材の最大せん断力を同時に再現するユニバーサルな等価静的風荷重分布を示す。なお、等価静的風荷重は屋根高さでの設計用速度圧(1.5kN/m^2)により基準化した。モデル1では風上端部で絶対値が大きく、長手方向に比較的一様な分布を示している。一方、モデル2では屋根風上中央部で荷重が集中している部分が見られる。これは、風と直交する方向の部材に対してもせん断力が作用しているためである。

5.2 全部材の最大曲げモーメントを同時に再現するユニバーサルな等価静的風荷重

図7に全部材の最大曲げモーメントを同時に再現するユニバーサルな等価静的風荷重分布を示す。モデル1では、先に示した図6(a)(せん断力)と、図7(a)(曲げモーメント)を比較すると、等価静的風荷重分布にほとんど差がない。一方、

モデル2の図6(b)(せん断力)と図7(b)(曲げモーメント)では両者の違いが顕著である。このように、等価静的風荷重分布は構造モデルにより変わるだけでなく、着目する荷重効果の種類によっても分布に違いが表れる場合がある。

図8に次式により定義した係数ベクトル $\{C\}$ の絶対値の寄与率および累積寄与率を示す。

$$i\text{次モード寄与率} = \frac{|C_i|}{\sum |C_i|} \quad (8)$$

なお、最大曲げモーメント用の等価静的風荷重に対する各規準モードの割合は、最大せん断力によるものとほぼ同様の傾向を示すので割愛する。

モデル1では1次モードの割合が最も高く全体の37.7%を占め、次いで2次(8.8%)、10次(5.5%)の順となっている。一方、モデル2では1次モードが14.8%で、モデル1の1次モードの半分以下の割合を示し、以下、2次(7.6%)、9次(7.2%)の順となっている。

図5 屋根構造モデル

図6 すべての部材の最大せん断力を同時に再現する等価静的風荷重分布

図7 すべての部材の最大曲げモーメントを同時に再現する等価静的風荷重分布

これらを累積した割合は、モデル1が15次までで約80%を示しているのに対し、モデル2では53%程度を示している。最大荷重効果に対する標準モードの占める割合は、モデル1およびモデル2共に1次の標準モードが大きな割合を示すが、全ての部材の最大荷重効果を精度良く再現するにはより高次の標準モードの重ね合わせが必要であることがわかる。

5.3 全部材の最大曲げモーメントと最大せん断力の両者をともに再現するユニバーサルな等価静的風荷重

これまで、曲げモーメントやせん断力などによる最大荷重効果を別々に検討してきたが、複数の種類の最大荷重効果を同時に再現することができる。まず、最大荷重効果および影響関数マトリクスを次式のように最大荷重効果の最大値により基準化する。

$$\hat{r}_{\max} = \max\{\hat{r}\} \quad (9)$$

$$\{\hat{r}^*\} = \frac{\{\hat{r}\}}{\hat{r}_{\max}} \quad (10)$$

$$[I_R^*] = \frac{[I_R]}{\hat{r}_{\max}} \quad (11)$$

こうして基準化された最大荷重効果および影響関数マトリクスをそれぞれ式(5)の形式に再合成すると、複数の部材および応力に対する最大荷重効果を同時に再現する等価静的風荷重を、全く同じプロセスで算定することができる。

図9に、すべての部材の最大せん断力および最大曲げモーメントを同時に再現する等価静的風荷重分布を示す。モデル1では、せん断力および曲げモーメントをそれぞれ単独に解析した場合(図6(a)および図7(a))と分布形状はほとんど変わらない。モデル2の、両者を同時に再現する等価静的荷重分布は、図6(b)に示したせん断力に対する分布とほぼ一致する。

5.4 最大荷重効果の比較

図10に、時刻歴解析により求めた真の最大荷重効果 $\{\hat{r}\}$ に対し、等価静的風荷重により算定された荷重効果を比較して示す。図10(c)および(f)は、最大せん断力および最大曲げモーメントの最大値でそれぞれ基準化している。

図10(a)~(c)に示すように、モデル1では、最大せん断力、最大曲げモーメントおよび両者を同時に再現する等価静的風荷重による荷重効果は、真の最大荷重効果とほぼ一致している。この理由は、風に直交する部材がピン接合されているので力の伝達が生じず、対象とする最大荷重効果の数 M と求めるべき未知数 N が等しくなったためである。

モデル2では部材どうしが格子状に剛接合されているため、力が面的に伝達する。したがって、求めるべき未知数 N に比べると対象とする最大荷重効果の数 M の方が大きくなる。図10(d)に示す最大せん断力は、真の最大せん断力に対して若干ばらつきが見られる。せん断力は部材の両端に作用する力の差などの局所的な荷重が影響する。したがって、モデル2では風に平行する方向の部材のみならず、風に直交する方向の部材の最大せん断力も考慮しているため、このようなばらつきが生じたものと考えられる。

図8 係数ベクトルの寄与率および累積寄与率

図9 すべての部材の最大せん断力と最大曲げモーメントを同時に再現する等価静的風荷重分布

図10(e)に示す最大曲げモーメントは、真の最大曲げモーメントとほぼ一致する。図中の最大曲げモーメントが所々まとまっている部分は、風に平行する方向の部材の最大曲げモーメントが屋根風上から固定端に向かって大きくなり、隣り合う部材どうしでは値の差があまりないことを示している。風に直交する方向の部材では、風に平行な方向の部材と比べて大きな曲げモーメントは生じない。

図10(f)に示す最大荷重効果は、真の最大荷重効果に対して若干ばらつきがみられるが良い対応を示している。図10(f)に対応する等価静的風荷重は、図9(b)に示したように最大せん断力を生じさせる分布にほぼ一致している。しかし、図中の◇(せん断力)および○(曲げモーメント)で示した最大荷重効果は、それぞれ個別に解析した図10(d)および(e)の最大荷重効果の分布とほぼ同じであり、最大荷重効果の推定精度に大きな差はない。曲げモーメントは、作用する風荷重に対して空間積分した形で求められるため、図9(b)に現れるような等価静的風荷重の局所的に大きな値の影響が出にくいものと考えられる。

6. 結論

本研究で得られた結論を総括し以下にまとめる。

1. すべての構造部材および、複数の種類の準静的な最大荷重効果を同時に再現できるユニバーサルな等価静的風荷重の算定法を提案し、大スパン片持ち屋根の2種類の構造モデルに適用した。その結果、ユニバーサルな等価静的風荷重による最大荷重効果は、時刻歴解析により求めた最大荷重効果を精度良く再現することができ、本手法の有効性が確かめられた。

図 10 すべての部材の最大せん断力、最大曲げモーメントおよび両者を同時に再現する等価静的風荷重による最大荷重効果と、真の最大荷重効果の比較

2. 本例では、等価静的風荷重を POD 解析による規準モードの重ね合わせにより表す手法を示した。1 次の規準モードは等価静的風荷重に対する寄与率が高かったが、精度の高い等価静的風荷重を算定するには高次のモードまで必要であることが分かった。等価静的風荷重を更に効率的に表すことのできる風荷重分布については、今後検討すべき課題の一つに挙げられる。

参考文献

- 1) 建設省住宅局：建築基準法令集，日本建築学会，2000 年
- 2) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，2004 年 9 月。
- 3) 田村幸雄，藤井邦雄，上田宏：大スパン屋根の骨組み用設計風荷重について，日本風工学会誌，第 41 号，pp.97-98，1989 年 10 月。
- 4) 田村幸雄，藤井邦雄，上田宏，勝村章：陸屋根弾性梁の設計風荷重の評価，第 12 回風工学シンポジウム論文集，pp.411-416，1992 年。
- 5) 上田宏，田村幸雄：陸屋根構造梁の等価設計用風圧係数，日本建築学会構造系論文集，第 464 号，pp.59-69，1994 年 10 月。
- 6) Kasperski, M.: Extreme wind load distributions for linear and nonlinear design, Engineering Structures, Vol. 14, No. 1, pp.27-34, 1992.
- 7) Kasperski, M. and Niemann H.-J.: The L.R.C.(load-response-correlation) - Method: A General Method of Estimating Unfavourable Wind Load Distributions for Linear and Non-linear Structural Behaviour, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 41-44, pp.1753-1763, 1992.
- 8) Holmes, J.D.: Wind Loading of Structures, Spon Press, London, 2001.
- 9) Holmes, J.D.: Effective static load distributions in wind engineering, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 90, pp.91-109, 2002.
- 10) 菅沼信也，田村幸雄，日比一喜，菊池浩利：低層建物の準静的な最大フレーム応力発生時の風圧分布，日本風工学会誌，第 79 号，pp.125-126，1999 年 4 月。
- 11) 田村幸雄，日比一喜，菊池浩利：低層建物の最大風力の組み合わせと準静的な真の最大荷重分布，第 16 回風工学シンポジウム論文集，pp.535-540，2000 年。
- 12) Tamura, Y., Kikuchi, H. and Hibi, K.: Actual extreme pressure distributions and LRC formula, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 90, pp.1959-1971, 2002.
- 13) Davenport, A.G.: Gust loading factors, Journal of the Structural Division, ASCE 93, pp.11-34, 1967.
- 14) Zhou, Y. and Kareem, A.: Gust loading factor: New model, Journal of Structural Engineering, ASCE 127, pp.168-175, 2001.
- 15) Solari, G and Repetto, M. P.: Equivalent static wind actions on structures, Proceedings, Engineering Symposium to honour ALAN G. Davenport for his 40 years of contributions, London, Ontario, 2002.
- 16) Australian/New Zealand Standard: Structural design actions, Part 2: Wind actions, AS/NZS 1170.2, 2002.
- 17) 勝村章，片桐純治，安井八紀，丸川比佐夫，田村幸雄，渡辺邦夫：大スパン構造物の風応答に関する研究，第 14 回風工学シンポジウム論文集，pp.533-538，1996 年。
- 18) Kikuchi, H., Tamura, Y., Ueda, H. and Hibi, K.: Dynamic wind pressures acting on a tall building model - proper orthogonal decomposition, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 69-71, pp.631-646, 1997.

(2004 年 7 月 10 日原稿受理，2004 年 12 月 21 日採用決定)