

## 信頼性水準に応じた風荷重の組合せに関する研究

### Study on the Combination of Wind Loads Corresponding to Reliability Level

建築防災分野 若山 愛  
Building Disaster Prevention Ai WAKAYAMA

建築物の耐風設計では、風方向、風直交方向、ねじれ方向の水平荷重の最大値を用いるのではなく、ある方向の荷重の最大値とその時同時に発生すると考えられる他方向の荷重値を組み合わせる。その際用いる組合せ係数を応答から直接求める手法の提案を行った。指針で示されている組合せ係数との比較を通して、より合理的な設計を行うためには、本研究で提案する組合せ係数を用いる必要があり、この係数を用いることで、風荷重の組合せを信頼性水準に基づき評価することを示した。

Instead of using the maximum value of the wind loads in the wind direction, the wind orthogonal direction, and the twist direction, the combination of the maximum value of the wind load in one direction and the other load occurring at the same time should be employed in the wind resistant design of the building. A method to which enables to obtain the coefficient for such combination directly coefficients from the response is proposed. The comparison with the combination coefficient suggested by the guidelines indicated that it is necessary to use the combination coefficient proposed in this research to make a more rational design suggested the combination of wind loads is set to the reliability level based on the results.

#### 1. 序論

建築物にある方向から風が吹くとき、風方向だけに振動するのではなく、水平方向については風向きに直交する方向（風直交方向）とねじれ方向にも同時に振動する。そのため、ひとつの風向の風荷重について検討を行う場合であっても、これら3つの水平方向の荷重の影響を考慮しなければならない。一般に、風荷重は風外力だけでなく、建築物が振動することによって生じる慣性力も考慮して求められる。耐風設計では、各方向の応答の間には必ずしも高い相関があるとは限らないため、各方向の風荷重の最大値を同時に用いることは、構造設計において過大評価となる可能性が高い。そこで、ある方向の荷重の最大値とその時同時に発生すると考えられる他方向の荷重値を組合せて用いる。その際に用いる組合せ係数は、荷重の最大値からの低減率を意味する。

建築物荷重指針・同解説<sup>1)</sup>において、風直交方向とねじれ方向の組合せ係数は、相関係数を用いた近似式によって求める方法を用いているが、染川ら<sup>2)</sup>は、時刻歴応答解析に基づく評価では相関係数から予測される値よりも大きな値を取りうることを示した。そのため時系列データの応答から求めた組合せ係数を用いて、設計用風荷重を決定する際に必要となる

組合せ係数を決める方法を検討する必要があると考える。そこで本研究では、風洞実験によって3000組のデータを取得し、風荷重の組合せ係数を統計的に評価することを目的とした検討を行った。本研究で提案した組合せ係数は、確率的な評価が可能なものとし、これを用いることで現在の建築物荷重指針の組合せ係数の信頼性水準の評価や、信頼性水準に基づく設計用風荷重の評価を試みた。

#### 2. 風洞実験概要

実験は、大阪市立大学所有のエッフェル型風洞実験装置を用いて行った。風洞実験には実スケールで高さ  $H=96\text{m}$ 、見つけ幅  $B=32\text{m}$ 、奥行き（代表長さ） $D=32\text{m}$ の角柱模型1と  $H=96\text{m}$ 、 $B=64\text{m}$ 、 $D=32\text{m}$ の角柱模型2を用いた。模型の縮尺は1/400とし、実験気流は地表面粗度区分Ⅲを模擬、模型頂部高さでの風速を10.3m/sとした。実験風向は、角柱模型1では模型の一辺に正対する風向（風向 $0^\circ$ ）、角柱模型2では模型の短辺、長辺それぞれに正対する風向（風向 $0^\circ$ 、 $90^\circ$ ）とした。以後、角柱模型1の結果を  $D/B=1$ 、角柱模型2の短辺に正対する風向を  $D/B=2$ 、長辺に正対する風向を  $D/B=0.5$  と呼ぶこととする。風向と建物の構造軸の関係を図1に示す。X方向は風方向、Y方向は風直交方向である。建物頂部での風速を49.2m/sとす

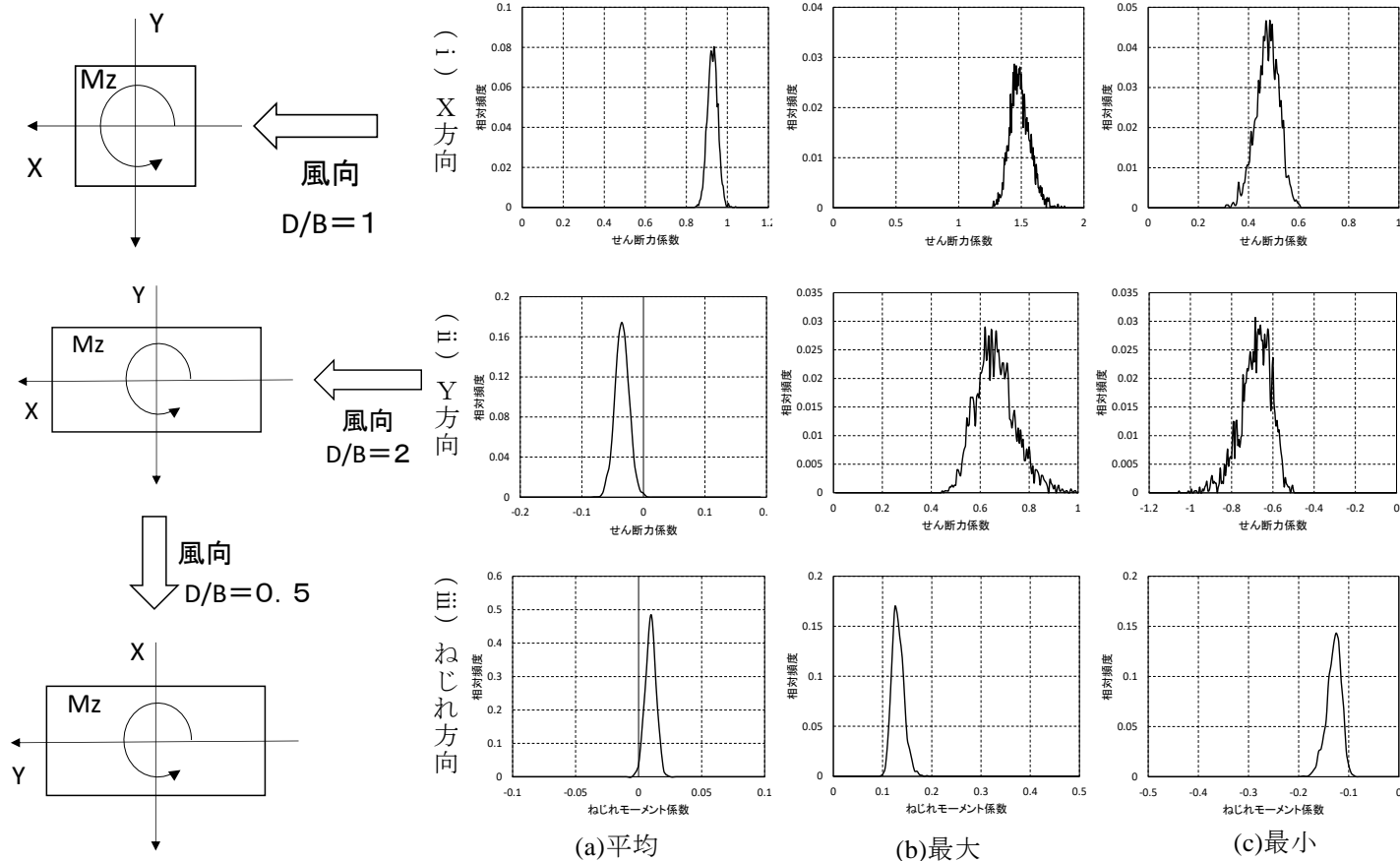


図1 風向と構造軸

ると、模型頂部での風速は 10.3m で実時間 10 分は 7.2 秒となる。データの計測は、1 風向につきサンプリング周波数 800Hz で 3000 組のデータを得た。

### 3. 空気力係数の統計的性質

$D/B=1$  のときの 3000 組分の X、Y 方向の平均せん断力係数、最大せん断力係数および最小せん断力係数と平均ねじれモーメント係数、最大ねじれモーメント係数および最小ねじれモーメント係数の頻度分布を図 2 に示す。建物形状に基づいて算定したせん断力係数やねじれモーメント係数では、平均値の頻度分布は、正規分布の形状に近くなっており、最大値の頻度分布は左に、最小値の頻度分布は右に偏った形状になるという特徴がみられた。これらの特徴は、 $D/B=2, 0.5$  の時も同様にみられた。

### 4. 時刻歴応答解析概要

想定した建物は建物密度  $180\text{kg/m}^3$ 、減衰定数  $\zeta$  を 1%、2% および 5% とし、建物の固有振動数を設計風速と見つけ幅で無次元化した無次元固有振動数  $n_0$  を 0.05～0.5 まで変化させた。振動モードは直線モードとし、実験で得られた 1 次の一般化風力を用いた。時刻歴応答解析は Newmark の  $\beta$  法を用い、 $\beta=1/6$  とした。

$\zeta=0.02$  のときの X、Y、ねじれ方向の最大応答の頻度分布を図 3 に示す。X 方向の応答の方が Y 方向の応答よりも 2 倍ほど大きくなっている。また  $n_0=0.5$  の各方

図 2 空気力係数の頻度分布

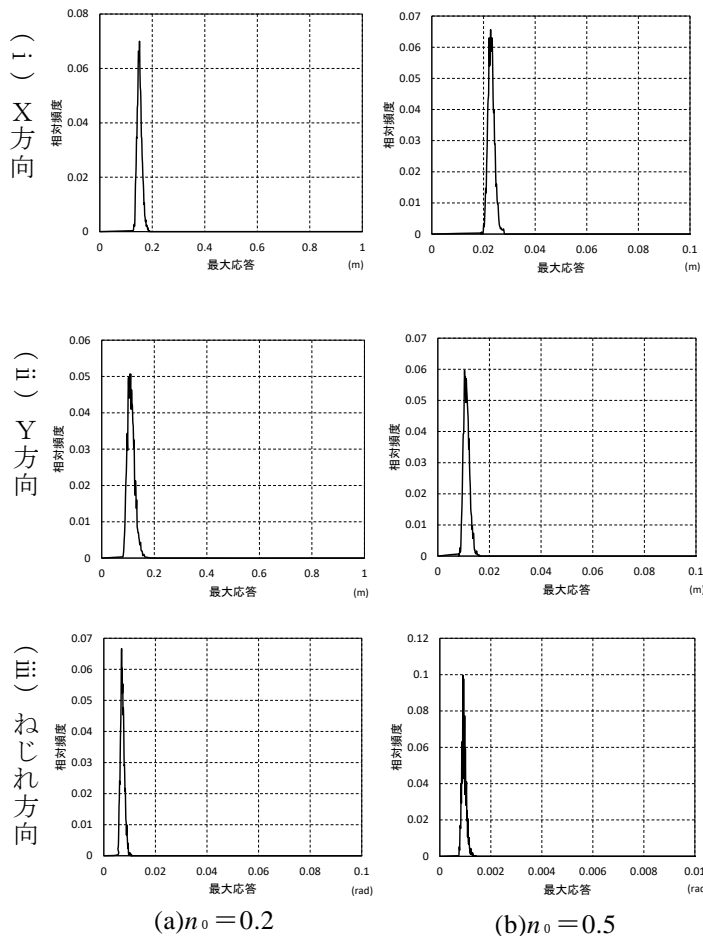


図 3 最大応答の頻度分布 ( $D/B=1, \zeta=0.02$ )

向の最大応答は、 $n_0=0.2$ の各方向の最大応答の10%ほどの値になっており、建物の固有振動数が異なると風方向、風直角方向およびねじれ方向の最大応答は大きく変化することがわかる。また、風力のX方向のせん断力係数とX方向の最大応答の変動係数を表2に示す。 $n_0$ や $\zeta$ の値が大きくなると、応答の変動係数が小さくなりばらつきが小さくなっていることがわかる。これは、建物の振動が小さくなり、建物の応答よりも外力の変動の方が早くなっているためであると考えられる。

X方向とY方向、Y方向とねじれ方向、X方向とねじれ方向の風力の相関係数を図4に、応答の相関係数を図5に示す。X方向とY方向の相関係数、X方向とねじれ方向の風力と応答の相関係数の頻度分布は左によった形状をしており相関係数が小さいことがわかる。応答の相関の方では、 $n_0$ や $\zeta$ の値によって多少の変化は見られたが、どの場合でも相関は低かった。Y方向とねじれ方向の応答の相関係数の頻度分布は、 $n_0$ 、 $\zeta$ の値によって相関係数の値は大きく変動する。 $n_0=0.2$ のときよりも $n_0=0.5$ のときの相関係数の方が大きく、また $\zeta$ の値が大きくなると相関が高くなり外力の相関係数に近づいていく傾向が見られた。

### 5. 時刻歴応答解析による風荷重の組合せ

組合せ係数 $\gamma$ は、風荷重の組合せに用いる係数である。組合せ風荷重は表3に表す3通りを考慮する。

#### 5.1 風荷重の組合せ係数の評価方法

荷重指針では、高層建築物（アスペクト比が $H/\sqrt{BD}$ が3以上の建築物）における風直角方向とねじれの組合せ係数は、応答の相関係数を用いて表されている。このときの組合せ係数を $\gamma_R$ とし、式(1)に示す。

$$\gamma_R = \sqrt{2 + 2\rho_{YMz}} - 1 \quad (1)$$

$\rho_{YMz}$ ：風直角方向とねじれ方向の応答の相関係数

一方、本研究では相関係数に基づく評価方法ではなく、時刻歴応答解析の結果を用いることによって、組合せ係数 $\gamma$ を応答の値から直接求める方法で組合せ係数を評価する。X方向の応答が最大となる時刻を $T_{Xmax}$ 、Y方向の応答が最大となる時刻を $T_{Ymax}$ 、ねじれ方向の応答が最大となる時刻を $T_{Mzmax}$ とすると、組合せ係数は以下のように表される。

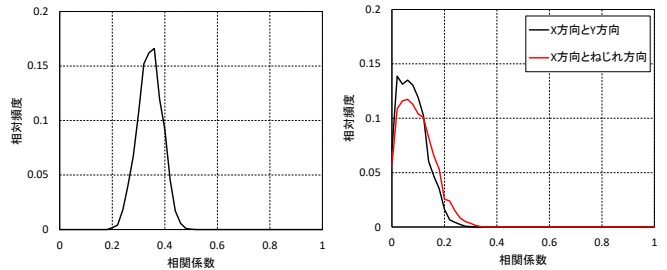
$$\gamma_{XY1} = |X(T_{Ymax})|/|X|_{\max} \quad \text{または} \quad \gamma_{XY2} = |Y(T_{Xmax})|/|Y|_{\max} \quad (2)$$

$$\gamma_{YZ1} = |Y(T_{Mzmax})|/|Y|_{\max} \quad \text{または} \quad \gamma_{YZ2} = |M_z(T_{Ymax})|/|M_z|_{\max} \quad (3)$$

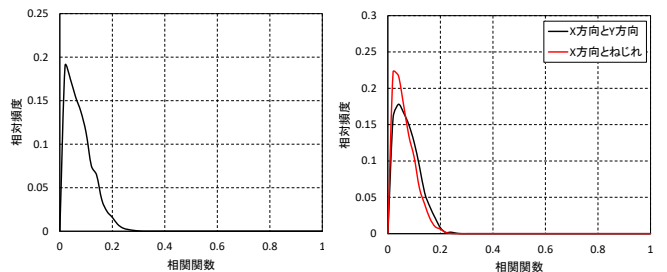
$$\gamma_{XZ1} = |X(T_{Mzmax})|/|X|_{\max} \quad \text{または} \quad \gamma_{XZ2} = |M_z(T_{Xmax})|/|M_z|_{\max} \quad (4)$$

表2 応答と外力の変動係数

	応答				風力 CF <sub>x</sub>
	$n_0=0.1$ $\zeta=0.02$	$n_0=0.2$ $\zeta=0.02$	$n_0=0.5$ $\zeta=0.02$	$n_0=0.5$ $\zeta=0.05$	
D/B=1	0.08	0.06	0.06	0.05	0.03
D/B=2	0.07	0.06	0.06	0.06	0.03
D/B=0.5	0.07	0.06	0.05	0.05	0.02



(a) Y方向とねじれ (b) X方向と他2方向  
図4 風力の相関係数(D/B=1)



(a) Y方向とねじれ (b) X方向と他2方向  
( $n_0=0.2, \zeta=0.02$ ) ( $n_0=0.2, \zeta=0.02$ )  
(c) Y方向とねじれ (d) Y方向とねじれ  
( $n_0=0.2, \zeta=0.05$ ) ( $n_0=0.5, \zeta=0.02$ )

図5 応答の相関係数(D/B=1)

表3 組合せ荷重

組合せ	X方向 組合せ荷重	Y方向 組合せ荷重	ねじれ方向 組合せ荷重
X方向 最大応答時	$W_X$	$\gamma_{XY} W_Y$	$\gamma_{XMz} W_{Mz}$
Y方向 最大応答時	$\gamma_{XY} W_X$	$W_Y$	$\gamma_{YMz} W_{Mz}$
ねじれ方向 最大応答時	$\gamma_{XMz} W_X$	$\gamma_{YMz} W_Y$	$W_{Mz}$

ここで、 $X_{max}$ は風方向であるX方向の応答の最大値、 $Y_{max}$ は風直角方向であるY方向の応答の最大値、 $M_{zmax}$ はねじれ方向の応答の最大値を表す。 $\gamma_{XY1}$ と $\gamma_{XY2}$ の値のうち大きい方を $\gamma_{XY}$ 、 $\gamma_{YZ1}$ と $\gamma_{YZ2}$ の値のうち大きいほうを $\gamma_{YZ}$ 、 $\gamma_{XZ1}$ と $\gamma_{XZ2}$ の値のうち大きい方を $\gamma_{XZ}$ とする。

## 5.2 組合せ係数の頻度分布

相関係数から求めた組合せ係数 $\gamma_R$ と応答から直接求めた組合せ係数 $\gamma_{YZ}$ の頻度分布を図6に示す。

D/B=1では、 $\gamma_R$ は $n_0=0.05, 0.1$ で最も大きくなっており、平均は0.7程度であった。 $\zeta$ が大きくなるにつれて $n_0=0.2\sim 0.5$ では組合せ係数が大きくなっているが、 $\zeta=0.05$ の時 $n_0=0.2$ での組合せ係数は最も小さくなり、他の $n_0$ の時と比べあまり上昇していないことがわかる。 $n_0=0.05, 0.1$ では $\zeta$ が大きくなるにつれて小さくなっている。 $\gamma_{YZ}$ は $n_0=0.05, 0.1$ のとき最も大きくなっており、平均は0.5程度で、1に近い値をとる場合もあった。 $\zeta$ が大きくなるにつれて $n_0=0.2\sim 0.5$ では組合せ係数が大きくなっており、 $n_0=0.05, 0.1$ では小さくなっている。これは $\gamma_R$ の時と同じ傾向を示している。

D/B=2では、 $\gamma_R$ は $n_0=0.2$ で最も小さく、 $\zeta$ が大きくなるとばらつきは小さくなっているが、組合せ係数の上昇はあまり見られない。 $\zeta$ の違いによる変化は他の $n_0$ の値のときでもあまり見られない。 $\zeta=0.05$ のときの $n_0=0.3\sim 0.5$ では、組合せ係数はほぼ近い値になっており、分布形状も似たようなものになっている。 $\gamma_{YZ}$ は $\zeta$ が大きくなるにつれて、 $n_0=0.2$ での組合せ係数は少し大きく、 $n_0=0.4$ での組合せ係数は少し小さくなっているが、 $\gamma_R$ のときと同様、あまり変化は見られなかった。

D/B=0.5では、 $\gamma_R$ は $n_0=0.1, 0.2$ で最も小さく、 $\zeta$ が大きくなるにつれて $n_0=0.1\sim 0.5$ では大きくなっている。中でも $n_0=0.2$ のときの組合せ係数は、0.2ほど大きくなっている。 $n_0=0.1$ の組合せ係数は $\zeta=0.02$ のとき最も小さくなる。 $\zeta$ が大きくなると、組合せ係数のばらつきは小さくなる傾向にあるが、 $n_0=0.1$ ではそれがあまりみられない。 $n_0=0.05$ で組合せ係数は最も大きくなっている。 $\gamma_{YZ}$ でもこの傾向は見られ、1に近い値をとる頻度が最も高くなった。 $\gamma_R$ と同じように、 $\zeta$ が大きくなるにつれて $n_0=0.1\sim 0.5$ で大きくなり、 $n_0=0.1$ の組合せ係数は $\zeta=0.02$ のとき最も小さくなっている。どの建物形状でも、平均値は $\gamma_R$ のほうが $\gamma_{YZ}$ より小さくなったが、 $\gamma_{YZ}$ では、ばらつきが大きく、1に近い大きい組合せ係数をとる可能性もあることがわかる。

## 5.3 組合せ係数の確率分布

組合せ係数 $\gamma_{YZ}$ の確率分布とワイブル分布でモデル化した結果の比較を図7に示す。ここで用いるワイブル分布の位置パラメータ $\varepsilon=0$ とする。ワイブル分布の累積分布関数を、式(5)に示す。

$$F(x) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^m\right\} \quad (5)$$

$\eta$ : 尺度パラメータ  $m$ : 形状パラメータ

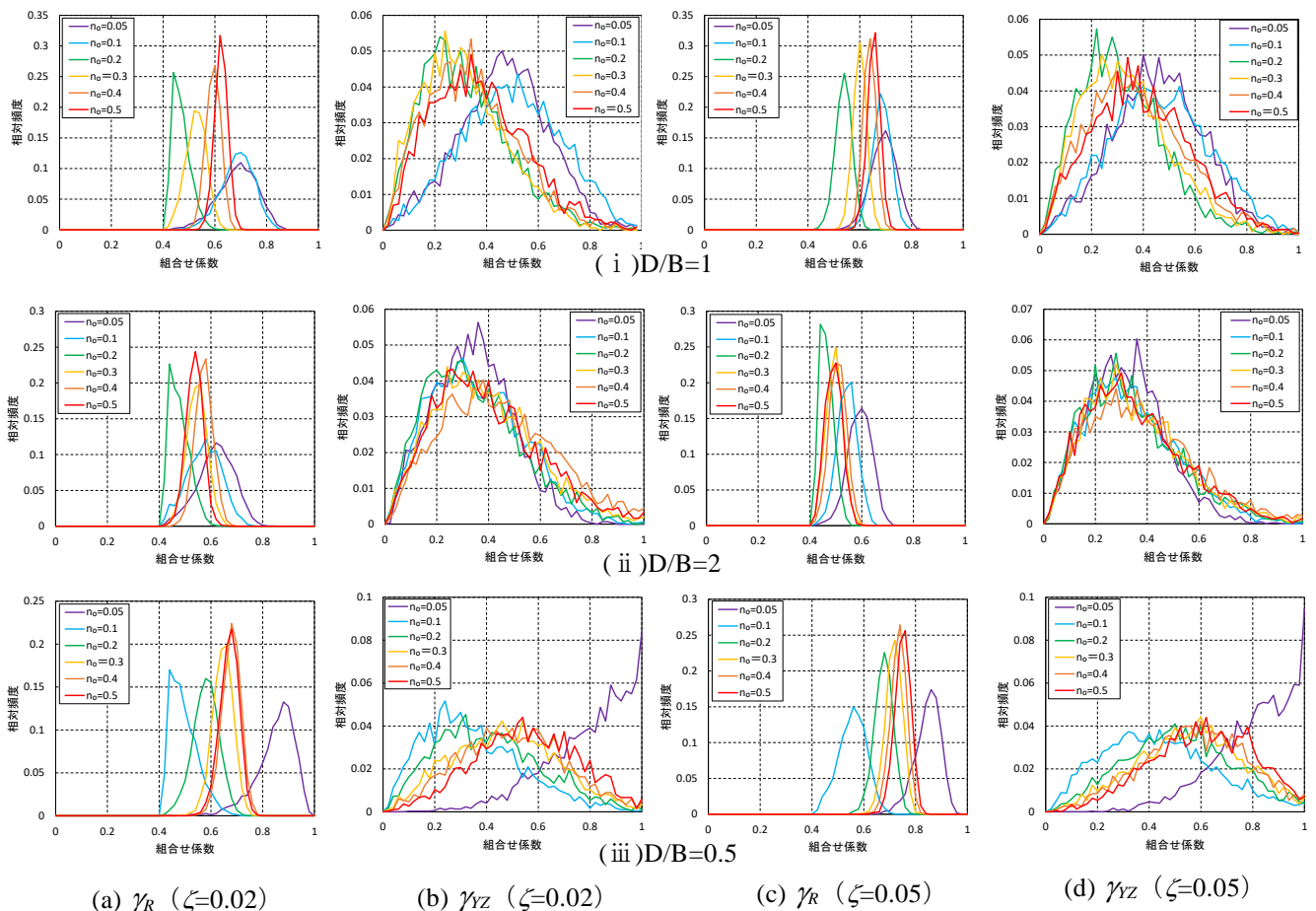


図6 組合せ係数の頻度分布

$\gamma_{YZ}$  の確率分布は  $n_0$  の値に関わりなくワイブル分布にほぼ近似できる分布形になっていることがわかった。どの辺長比の場合でも組合せ係数の確率分布はワイブル分布に近似できた。

応答から直接求めた組合せ係数  $\gamma_{YZ}$  と相関係数から求めた組合せ係数  $\gamma_R$  を比較した結果を図 8 に示す。非超過確率の観点からみると、 $\gamma_R$  は  $\gamma_{YZ}$  を非超過確率の 85% あたりまで大きく下回っており、 $\gamma_R$  は極めて安全側にある。しかしながら、85% を超えたあたりでは  $\gamma_R$  が  $\gamma_{YZ}$  を上回っているため、 $\gamma_R$  は組合せ風荷重を危険側に評価してしまう可能性があるといえる。図中の青印は荷重指針の相関係数から求められた組合せ係数を表している。D/B=0.5 では指針値はほぼ安全側かつ過剰設計ではない点になっているが、D/B=1, 2 では危険側の値である。また建物形状によって指針値の組合せ係数の非超過確率にはばらつきがある。

応答から求めた組合せ係数  $\gamma_{YZ}$  の非超過確率を用いると、ある組合せ係数を超えない確率はどの程度なのかを知ることができ、風荷重の組合せを信頼性水準に基づき評価することができると考えられる。設計者や施主がどの程度の安全性を考慮するのかを自ら設定できる点において、信頼性水準に基づいて組合せ係数を決定する手法は意義があると考えられる。

#### 5.4 荷重指針の組合せ係数の信頼性水準

応答から直接求めた組合せ係数  $\gamma_{YZ}$  の確率分布を用いて、指針値の組合せ係数と比較した結果を図 9 に示す。D/B=1 では荷重指針の組合せ係数の値は、98% タイル値に概ね相当する。 $\gamma_{YZ}$  は  $n_0=0.05\sim 0.3$  では指針値を下回るが、 $\zeta$  が大きい ( $\zeta=0.05$ ) とし、 $n_0=0.3\sim 0.5$  では指針値を上回る。これは、 $n_0$  が大きいほど指針値は安全側ではなく、組合せ係数の信頼性は 98% より低くなるということを示す。 $\zeta$  の値による変化は小さい。D/B=2 では荷重指針の組合せ係数の値は、85% タイル値に概ね相当する。 $n_0=0.05\sim 0.2$  では  $\gamma_{YZ}$  は指針値を下回り、 $n_0=0.25\sim 0.5$  では、D/B=1 の時とは異なり  $\zeta$  の値による変化が大きく、 $\zeta$  が小さい ( $\zeta=0.01$ ) ほど指針値を上回っている。しかし  $n_0=0.4$  あたりから組合せ係数は小さくなっている。D/B=0.5 では荷重指針の組合せ係数の値は 80% タイル値に概ね相当する。 $n_0=0.05$  で

は  $\gamma_{YZ}$  が極めて大きい値になっているが、指針値とほぼ同等である。 $n_0=0.2\sim 0.5$  では  $\zeta$  の値によって組合せ係数は 0.15~0.2 ほど変化しており、 $\zeta=0.05$  では指針値を上回っているが  $\zeta=0.01$  では大きく下回っている。 $n_0=0.1$  あたりから  $n_0$  が大きくなるにつれて組合せ係数も単調に大きくなっている。

このように、指針の組合せ係数は、建物形状や固有振動数、減衰定数の値によって、信頼性水準が異なることがわかった。応答から直接求めた組合せ係数の評価方法は、任意の信頼性を有する組合せ係数を設定できることが、指針の評価方法よりも優位な点であるといえる。

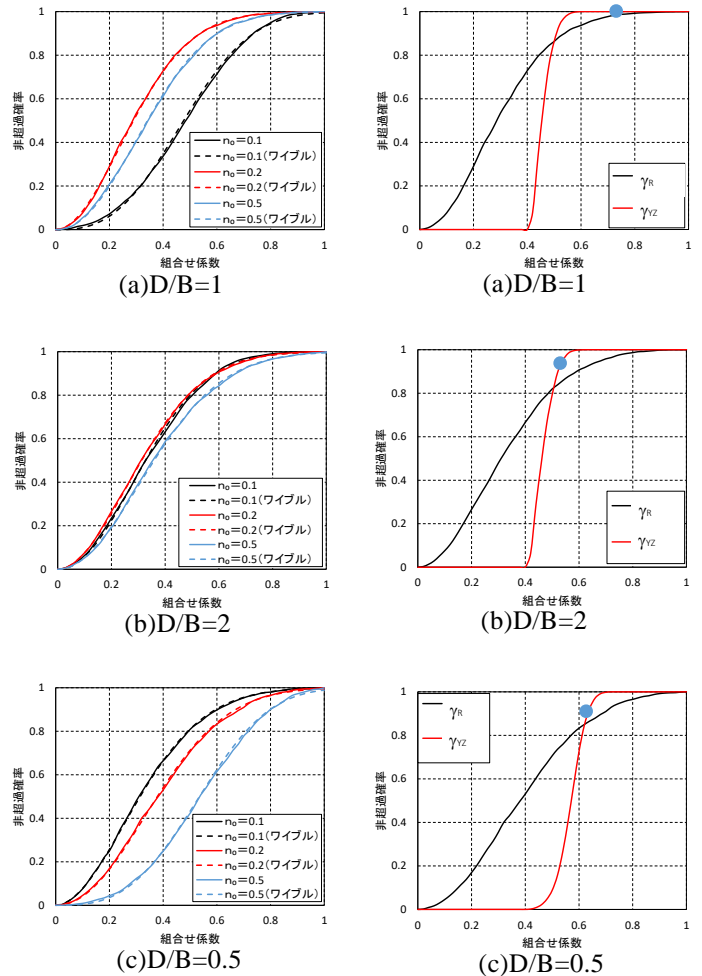


図 7 組合せ係数の確率分布 ( $\zeta=0.02$ )

図 8 組合せ係数の比較 ( $n_0=0.2, \zeta=0.02$ )

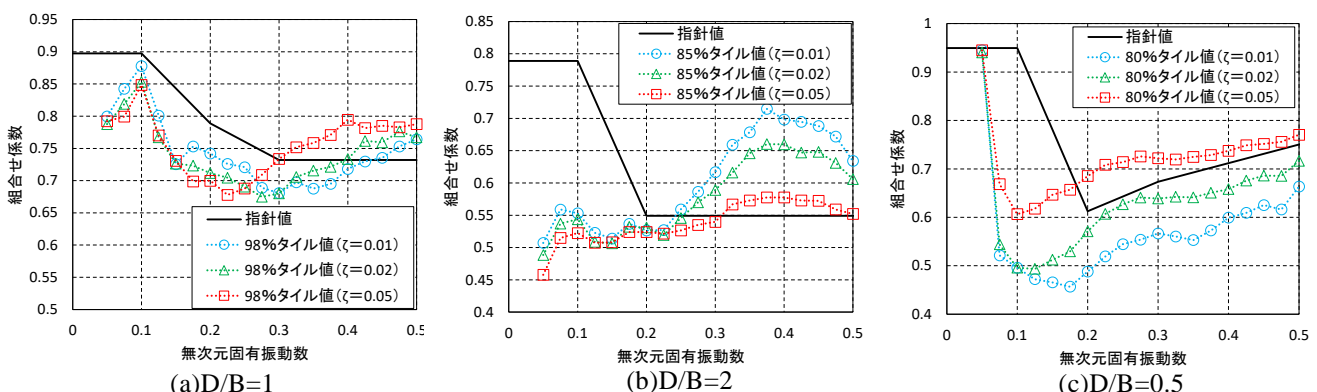


図 9 荷重指針の組合せ係数との比較

### 5.5 信頼性に応じた組合せを考慮した風荷重の提案

最大応答に基づく X、Y、ねじれ方向の荷重を求める。建築物の剛性を X、Y 方向それぞれ  $K_X, K_Y$ 、X、Y 方向の最大応答変位の平均値を  $\bar{X}_{max}, \bar{Y}_{max}$  とし、X、Y 方向の最大風荷重を式に示す。

$$W_{Xmax} = K_X \times \bar{X}_{max} \quad W_{Ymax} = K_Y \times \bar{Y}_{max} \quad (6)$$

また、ねじれ方向の建築物の回転剛性を  $K_{Mz}$ 、最大ねじれ角を  $\bar{\phi}_{max}$  とし、最大ねじれモーメント  $M_{Mzmax}$  を式に示す。

$$M_{Mzmax} = K_{Mz} \times \bar{\phi}_{max} \quad (7)$$

$\zeta=0.02$  のときの最大風荷重、最大ねじれモーメントを表 4 に示す。一般的な高層建築の固有振動数から計算される設計風速時の  $n_0$  は、0.15~0.3 程度であるが、その範囲でも  $n_0$  によって最大風荷重は大きく異なることがわかった。

表 3 で示した 3 通りの組合せ風荷重を考慮した風荷重を、組合せを考慮しない各方向の最大風荷重で除した値を図 10 に示す。ねじれ荷重は、建物の隅角部を検討することとし X、Y 方向のせん断力として分けることにより、X、Y 方向の風荷重を決めるものとする。X、Y 方向のせん断力を式(8)に示す。

$$W_{MzX} = W_{MzY} = \frac{M_{Mzmax}}{D} \quad (D/B=1 \text{ の時}) \quad (8)$$

図 10 の確率分布を用いることによって、組合せを考慮した風荷重は各方向の最大風荷重の何倍ほどになるのかを検査することができる。

高い信頼性を得るために最大風荷重に対する組合せを考慮した風荷重の割合を大きくすると、固有振動数の小さい建物では、設計用風荷重を大幅に大きくする必要がある。しかしながら、建築物の応答が小さい場合において、組合せを考慮した風荷重のわずかな変化に対して信頼性水準が大きく変化する。こうした建築物では耐力に少しの余裕をもたせることで大きな安全性を得ることができる。と考える。

### 6. 結論

本研究では、風洞実験によって 3000 組のデータを取得し、風荷重の組合せ係数を統計的に評価するための検討を行った。

時刻歴応答解析の結果を用いて、組み合わせ係数を応答から直接求める手法での提案を行った。ここで提案した手法では、組合せ係数を確率的に評価することが可能となった。荷重指針で示されている相関係数を用いて求める組合せ係数との比較を行ったところ、相関係数から求めた組合せ係数の方が、すべての建物形状で平均値が大きく、ばらつきが極めて小さいが、応答から直接求めた組合せ係数では、相関係数から求め

表 4 各方向の最大風荷重(D/B=1,  $\zeta=0.02$ )

	$n_0=0.1$	$n_0=0.2$	$n_0=0.3$	$n_0=0.4$	$n_0=0.5$
X方向 最大風荷重 (kN)	126044.81	27817.66	11871.19	6630.82	4230.82
Y方向 最大風荷重 (kN)	152761.34	20458.69	6858.12	3367.60	2037.70
ねじれ方向 最大モーメント (kN・m)	1274953.70	226230.00	95603.12	49544.31	29670.34

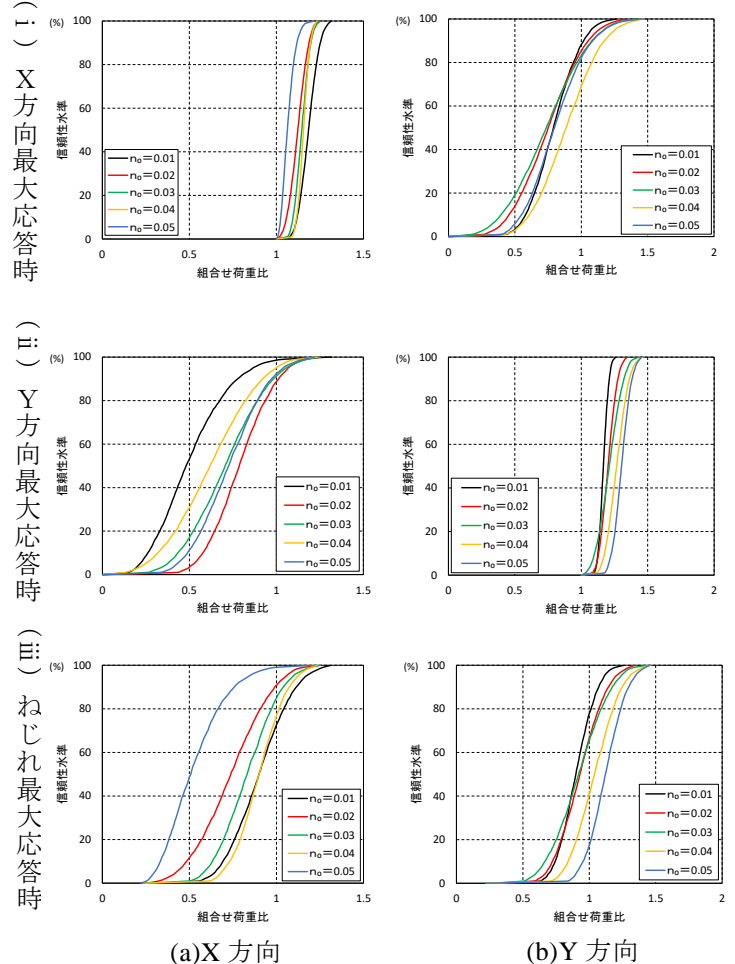


図 10 組み合わせた風荷重と最大荷重の比 (D/B=1,  $\zeta=0.02$ )

た結果よりも大きい値をとることもあり、危険側に設計し得る可能性があることが明らかになった。応答から求めた組合せ係数の非超過確率を用いると、ある組合せ係数を超えない確率はどの程度なのかを知ることができ、風荷重の組合せを信頼性水準に基づき評価することができることを示した。指針値の組合せ係数を信頼性水準に基づき評価すると、建物形状や固有振動数、減衰定数の値によって、一定の信頼性水準にはなっていないことがわかった。提案した組合せ係数を用いて組み合わせた荷重を求め、各方向の最大風荷重と任意の信頼性水準で、組合せを考慮した設計用風荷重を決定する確率分布を示した。

### 参考文献

- 1) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説 2015
- 2) 染川ら：POD 解析を用いた風荷重の組合せに関する検討、第 24 回風工学シンポジウム論文集, pp.331-336