

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	風洞実験に基づく高層建物の多層層風力によるエネルギー入力性状 (その1)高さ方向の空間相関モデルを用いたモーダル風力のエネルギー入力性状
Title	
著者(和文)	吉江慶祐, 大熊 武司, 北村春幸, 丸川比佐夫, 片桐純治, 佐藤大樹
Authors	Keisuke Yoshie, Takeshi Ohkuma, Haruyuki Kitamura, Hisao Marukawa, Daiki Sato
出典 / Citation	日本建築学会大会学術講演梗概集, Vol. B-1, No. , pp. 191-192
Citation(English)	, Vol. B-1, No. , pp. 191-192
発行日 / Pub. date	2010, 9
rights	日本建築学会
rights	本文データは学協会の許諾に基づきCiNiiから複製したものである
relation	isVersionOf: http://ci.nii.ac.jp/naid/110008067815

風洞実験に基づく高層建物の多層層風力によるエネルギー入力性状 (その1) 高さ方向の空間相関モデルを考慮したモーダル風力のエネルギー入力性状

正会員 ○吉江慶祐*1
同 大熊武司*2
同 北村春幸*3
同 丸川比佐夫*4
同 片桐純治*4
同 佐藤大樹*3

定常ランダム振動, エネルギー入力, 層風力
多質点系, 空間相関

1. 序

筆者ら一部は高層建物の強風時の弾塑性応答をエネルギーの釣合に基づいて予測する手法を提案してきた^{1),2)}など。提案手法は, 高層建物の1次モードに注目し, 構造物の1次モードに模擬した1質点振動系を対象とした変動風力による弾塑性構造物へのエネルギー入力の定式化((1)-(2)式)が基本となっている。

$$\bar{E}_0(f_0) = E[\dot{E}_{input}(f_0)] = \frac{1}{4m} S_F(f_0) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} E[\dot{E}_{input}] &= \int_0^\infty \text{Re}[H_v(f)] \cdot S_F(f) df \\ &= \int_0^\infty 4m \cdot \text{Re}[H_v(f)] \cdot \bar{E}_0(f) df \end{aligned} \quad (2)$$

ただし, f は振動数, f_0 は構造物の固有振動数, \dot{E}_{input} は単位時間あたりのエネルギー入力, $S_F(f)$ は変動風力のパワースペクトル密度関数(片側スペクトル), $E[\]$ は期待値, m は質量, $H_v(f)$ は速度に関する伝達関数を, $\text{Re}[\]$ は複素数の実部を示す。

上式は風外力による構造物へのエネルギー入力は, 無減衰弾性系へのエネルギー入力((1)式)によりその総量が定まる安定した量であり, 構造物の減衰あるいは塑性化の度合いにより時々刻々とその周期を変化させながら, それぞれの周期に対応する成分の風外力のエネルギーを受け取っており, (2)式に示すように, $4m \cdot \text{Re}[H_v(f)]$ により周期毎のエネルギー授受に関する重み関数が表現できることを示している。この基本式をもとに, エネルギーの釣合に基づき, 時刻歴応答解析を用いずに構造物の弾塑性風応答を予測する手法を提案し, その有効性を示した。

しかし近年, 免震構造の高層化・大型化が進み, 免震層の弾塑性風応答の評価の必要性が高まってきている。免震構造は免震層に変形が集中し, 履歴系ダンパーの場合, ダンパーの塑性化により振動モードが大きく変化するという特徴がある。先に述べた弾塑性風応答予測手法は, 塑性化後も振動モードには変化がないことを前提としており, 免震構造へ応用するためには, まず振動モード変化に対するエネルギー入力性状を明らかにする必要がある。

本研究は, 風力による多質点振動系へのエネルギー入力性状を検討し, 特に振動モードの変化がエネルギー入力に与える影響を調べることを目的とする。振動モード変化に対する検討を行う上で, 層風力の高さ方向の相関の影響は大きいと考えられるので, 本研究では高さ方向の相関として単純な関数によるモデルを用いた検討を行い(その1),

次報以降で, 風洞実験による層風力の測定結果を直接用いた検討を示す。

2. 層風力の高さ方向の相関を考慮したモーダル風力

はじめに層風力によるエネルギー入力に対する振動モードの影響を, 単純なモデルを用いて調べる。大熊らの研究³⁾をもとに, 層風力の規準化パワースペクトル密度および層風力間のコヒーレンスを以下のように仮定する。

- 1) 層風力の規準化パワースペクトル密度は高さ方向に一定とみなせ, 代表高さ(建物高さの2/3)の規準化パワースペクトル密度 $f \cdot S_{f_0}(f) / \sigma_{f_0}^2$ で代表できるものとする。 $(\sigma_{f_0}^2$ は代表高さの層風力の分散)
- 2) 高さ z_i と z_j の層風力のコヒーレンス $Co(f; z_i, z_j)$ は次式で近似できる。

$$Co(f; z_i, z_j) = \exp(-kv \cdot (f \cdot |z_i - z_j| / U_H)^r) \quad (3)$$

ただし, f : 振動数, $kv \cdot r$: 空間相関を表す係数, U_H : 頂部風速。

なお, コヒーレンス $Co(f; z_i, z_j)$ の定義は次式とする。

$$Co(f; z_i, z_j) = \frac{\text{Re}[C_{f_i f_j}(f)]}{\sqrt{S_{f_i}(f) \cdot S_{f_j}(f)}} \quad (4)$$

$S_{f_k}(f)$ は高さ z_k の層風力のパワースペクトル密度, $C_{f_i f_j}(f)$ は高さ z_i と z_j の層風力のクロススペクトル密度。

線形多質点系の運動方程式は次式で表わされる。

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{f(t)\} \quad (5)$$

$[M]$, $[C]$, $[K]$ はそれぞれ質量マトリックス, 減衰マトリックス, 剛性マトリックスであり, $\{x\}$, $\{f\}$ は変位ベクトル, 外力ベクトルである。ここで $[M]$ を j 番目の質点の質量 m_j を対角要素とする対角マトリックスとして, s 次固有振動モード $\{u_s\} (= \{u_{s1}, u_{s2}, \dots, u_{sn}\}^T)$ を用い, s 次の一般化質量 \tilde{M}_s と一般化外力 \tilde{F}_s を表すと,

$$\tilde{M}_s \equiv \{u_s\}^T [M] \{u_s\} = \sum_{j=1}^n u_{sj}^2 \cdot m_j \quad (6)$$

$$\tilde{F}_s(t) \equiv \{u_s\}^T \{f(t)\} = \sum_{j=1}^n u_{sj} \cdot f_j(t) \quad (7)$$

ここで, 一般化風力のパワースペクトル密度を求める。一般化外力 $\tilde{F}_s(t)$ のフーリエ変換は,

$$\begin{aligned} \tilde{F}_s(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{F}_s(t) e^{-i2\pi ft} dt \\ &= \sum_{j=1}^n u_{sj} \int_{-\infty}^{\infty} f_j(t) e^{-i2\pi ft} dt \end{aligned} \quad (8)$$

Energy Input of Local Wind Forces for High-rise Building based on Wind Tunnel Test
Part 1. Energy Input of Modal Wind Force considering Vertical Spatial Correlation Model

YOSHIE Keisuke, OHKUMA Takeshi,
KITAMURA Haruyuki, MARUKAWA Hisao,
KATAGIRI Junji and SATO Daiki

j 層の層風力 $f_j(t)$ のフーリエ変換は次式であり、

$$F_{f_j}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f_j(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (9)$$

(8) 式と (9) 式より、

$$F_{\bar{F}_s}(f) = \sum_{j=1}^n s u_j \cdot F_{f_j}(f) \quad (10)$$

よって、一般化風力のパワースペクトル密度 $S_{\bar{F}_s}(f)$ は、

$$\begin{aligned} S_{\bar{F}_s}(f) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \left[\frac{2F_{\bar{F}_s}^*(f)F_{\bar{F}_s}(f)}{T} \right] \\ &= \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n s u_j \cdot s u_k \lim_{T \rightarrow \infty} \left[\frac{2F_{f_j}^*(f)F_{f_k}(f)}{T} \right] \\ &= \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n s u_j \cdot s u_k \cdot C_{f_j f_k}(f) \end{aligned} \quad (11)$$

これに、前述の層風力の規準化パワースペクトル密度および層風力間のコヒーレンスの仮定を考慮し、次式を得る。

$$S_{\bar{F}_s}(f) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n s u_j \cdot s u_k \cdot C_o(f; z_j, z_k) \frac{\sigma_{f_j} \sigma_{f_k}}{\sigma_{f_0}^2} S_{f_0}(f) \quad (12)$$

ここで、変動風力係数を高さ方向に一定と仮定すると、

$$S_{\bar{F}_s}(f) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n s u_j \cdot s u_k \cdot C_o(f; z_j, z_k) \cdot S_{f_0}(f) \quad (13)$$

$$\text{ここで、} \quad sR(f) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n s u_j \cdot s u_k \cdot C_o(f; z_j, z_k) \quad (14)$$

を定義し、振動モード形 $u(z) = (z/H)^\beta$ (H は建物高さ) として、高層建物の 1 次モードに代表される直線のロッキングモード ($\beta = 1$) と免震建物の 1 次モードに代表されるスウェイモード ($\beta = 0$) の場合の $R(f)$ を数値積分により求める。計算は建物高さ $H = 200\text{m}$, $U_H = 60.7\text{m/s}$, 質量は高さ方向に均一に分布していると仮定して行った。建物の全質量を M とすると、モード形 $u(z) = (z/H)^\beta$ に対してモード質量 \bar{M}_s は $M/(1+2\beta)$ となる。

図 1 に $\beta=1$ と $\beta=0$ の場合の $R(f)$ の比を示す。図は $T = 1/f$ として横軸を周期 T として示している。 $\beta=1$ と $\beta=0$ の場合の $R(f)$ の比は $1/4 \sim 1/3$ になっており、 kv が小さい、つまり高さ方向の相関が大きいと $1/4$ に、 kv が大きく高さ方向の相関が小さい時は $1/3$ に漸近している。

3. モード形変化によるエネルギー入力

(1) 式と (13)・(14) 式より、無減衰系への s 次モードのエネルギー入力 $s\bar{E}_0(f)$ は代表高さ層風力のパワースペクトル密度 $S_{f_0}(f)$ を用いて次式で表される。

$$s\bar{E}_0(f) = \frac{1}{s\bar{M}} \cdot sR(f) \cdot S_{f_0}(f_0) \quad (15)$$

上式は無減衰系への s 次のモード風力によるエネルギー入力は $sR(f)/\bar{M}_s$ に比例することを示している。ゆえに図 1 はモード変化によるエネルギー入力の変化も示すことにな

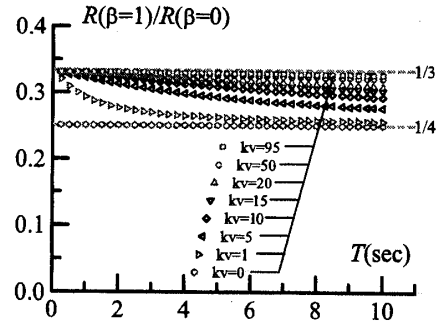


図 1 ロッキングモードとスウェイモードの $R(f)$ の比

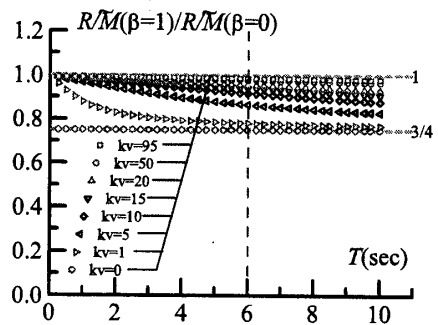


図 2 ロッキングモードとスウェイモードのエネルギー入力の比

るが、判りやすくするためにそれぞれをモード質量で除し、 $\beta = 1$ と $\beta = 0$ の場合の $R(f)/\bar{M}$ の比を図 2 に示す。横軸は周期 $T = 1/f$ としている。

$R(f)/\bar{M}$ の比は $3/4 \sim 1$ であり、 kv が小さいと $3/4$, kv が大きいと 1 に漸近する。層風力の kv の実用的範囲として 5 ~ 15 (図 2 中にグレーで着色プロット)、本試算の条件である $H = 200\text{m}$ に対応する周期範囲として 6sec 以下の範囲を考えると、 $R(f)/\bar{M}$ の比は $0.9 \sim 1$ 程度であり、実用的な範囲では振動モードが変化してもエネルギー入力はほぼ一定とみなすことが可能と考える。

4. まとめ

変動風力によるエネルギー入力に対する振動モード変化の影響を調べるために、層風力の空間相関のモデル式を用いた検討を行い、エネルギー入力にモード変化に対して鈍感で、実用的にはほぼ一定として扱える可能性のあることを示した。

謝辞

本研究は、神奈川大学大熊武司教授、東京理科大学北村研究室、(株)泉創建エンジニアリング、日建設計による新耐風設計法研究会で行ったものである。研究会関係各位に感謝をいたします。

参考文献

- 1) 吉江慶祐, 北村春幸, 大熊武司: 変動風力による弾塑性構造物への総エネルギー入力に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 572 号, pp. 31-38, 2003, 10.
- 2) 吉江慶祐, 北村春幸, 大熊武司, 和田章: エネルギーの釣合に基づく平均成分を有する広帯域性変動風力を受ける弾塑性構造物の応答予測手法, 日本建築学会構造系論文集, 第 608 号, pp. 21-28, 2006, 10.
- 3) 大熊武司, 丸川比佐夫, 丹羽秀聡, 寺本隆幸, 北村春幸, 吉江慶祐: 動的天秤データを利用した高層建物の風時刻歴応答解析, 第 12 回風工学シンポジウム論文集, pp. 207-212, 1992, 12.

*1 日建設計
*2 神奈川大学
*3 東京理科大学
*4 (株) 泉創建エンジニアリング

*1 Nikken Sekkei
*2 Kanagawa Univ.
*3 Tokyo Univ. of Science
*4 IZUMI SOHKEN Engineering Co., Ltd.