

弾塑性構造物の風応答性状ならびにその予測に関する研究

その1 風直角方向振動の場合

A STUDY ON WIND-INDUCED RESPONSE CHARACTERISTICS
AND PREDICTION FOR INELASTIC STRUCTURE

Part 1. A case of across-wind vibration

辻田 修*, 早部安弘**, 大熊武司***, 和田 章****

Osamu TSUJITA, Yasuhiro HAYABE, Takeshi OHKUMA and Akira WADA

As buildings have become higher, it is likely to find the wind loads that is equal to or even greater than the design seismic loads. Also, response control systems by hysteretic damping of steel have been developed for the aim of the response control or the damage control during seismic excitation. Then the subject that structural members yield under wind loading will become more important on structural design.

In this paper, to assure the safety of buildings with the yielding members under wind loading, inelastic response characteristics, e.g. the distributions of the fluctuating displacement, the maximum displacement, the absorbed energy and so on, under across-wind loading are investigated quantitatively through time history response analyses by using a single-degree-of-freedom system. And a stochastic method of estimating the inelastic responses under wind loading so as to be available for the evaluation of fatigue-damage is proposed on the basis of the zero-crossing peak-value distribution. It is confirmed that the predicted inelastic responses almost agree with the results of simulation.

keywords : wind force, across-wind vibration, inelastic response, peak-value distribution, energy input

風外力、風直角方向振動、弾塑性応答、ピーク値分布、入力エネルギー

1. 序

高層建築物の風応答の特徴として、外力のパワーは一般に建築物の固有振動数より低周波数で卓越し、固有周期が長くなるほどその弾性応答は大きくなること、地震に比べて継続時間が長く振動の繰り返し回数が多いこと、外力が変動成分のみでなく平均成分を有すること等が挙げられる。

建築物の構造設計において、耐震設計では大地震時に構造部材を塑性化させ、その履歴吸収エネルギーにより構造物の振動を抑制している。それに対し耐風設計では、建築物の高層化に伴い、風荷重と地震荷重が拮抗し風荷重によって構造部材が決定される建築物が出現しているもの¹⁾、想定される最大級の強風時においても構造体をほぼ弾性的挙動範囲内に留める部材設定が現在行われている。このような建築物の合理的な設計を行う上で、また、想定以上の風外力に対する挙動を把握する上で、塑性化に伴う長周期化による応答の増大と履歴減衰による応答の低下に関する性状を把握することが必要

である。

一方、地震時における構造物の応答制御、損傷制御を目的とした制振装置の開発も近年盛んに行われており、その様な制振装置の中には鋼材の履歴減衰を用いた装置も提案されている^{2), 3), 4)}。この場合、主体構造に比べて小振幅時より装置を塑性化させ、履歴によるエネルギー吸収を図ることを目的としているため、地震荷重に比べ風荷重が小さい建物でも風外力によって装置が塑性化することが考えられる。

これら弾塑性構造物の耐風安全性を確保するためには、風外力時における弾塑性応答性状の定量的把握と応答予測手法の確立が不可欠である。耐風安全性の評価尺度としては最大変形と累積損傷が想定されるが、風応答における累積損傷評価は未だ確立された分野ではなく、地震応答に用いられる累積塑性変形倍率による方法、疲労設計に用いられる振幅別損傷度の単純または重みづけ加算による方法等が考えられる。従って、弾塑性応答性状としては最大変形のみでなく、変動振幅の分布や平

本論文は文献12)に加筆したものである。

* 大成建設株式会社設計本部構造設計部 課長

** 大成建設株式会社設計本部構造設計部
主任・工修

*** 神奈川大学工学部建築学科 教授・工博

**** 東京工業大学工業材料研究所 教授・工博

Structural Engineering Dept., Design Division, Taisei Corporation
Structural Engineering Dept., Design Division, Taisei Corporation,
M. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Kanagawa
University, Dr. Eng.

Prof., The Research Lab. of Eng. Materials, Tokyo Institute of
Technology, Dr. Eng.

均変位に関する性状も把握しておく必要がある。また、予測手法としては、建物の使用年限中に想定される応答量を集計するといった膨大な継続時間に対応可能な、時刻歴応答解析を必要としない統計的手法が望まれる。

弾性構造物の風応答については、基本的には統計的予測手法が確立されており^{5), 6), 7)}、疲労設計手法も提案されている⁸⁾。しかし、弾塑性構造物の風応答については、完全弾塑性型復元力を有する構造物の風方向振動を対象に塑性化の小さな範囲での損傷の予測が行われているもの^{9), 10)}、先に述べた弾塑性構造物の応答予測に適用できるほど十分に把握されているとはいえない。

履歴型減衰部材を有する構造物の場合、制振効果を高める目的から装置の交換を前提に小振幅時より塑性化させることが考えられ、塑性化の大きな範囲までの弾塑性応答性状の検討が必要である。また、高層建築物の場合、高風速時の最大応答値は風方向振動時よりはむしろ風直角方向振動時に生じることが多く、風直角方向振動の検討も必要である。

実建物では骨組の不均一性や塑性化部材を限定させることなどにより層剛性として塑性化後も広い変形範囲において剛性を有している場合が多い。そこで、完全弾塑性モデルでは表現されない応答変位に応じて降伏耐力が変化する影響などを考慮した振動モデルでの応答性状の検討が必要と考えられる。

本研究は、弾性応答予測における確率統計的手法に、エネルギー的な考察を加えながら変動振幅の分布、最大変位、平均変位の推移などの弾塑性応答性状を明らかにし、それらの予測手法を示そうとするもので、本報告は、平均風力を有さずパワーが比較的特定周波数近辺に集中するという特徴を備えることの多い風直角方向風力に対する応答を対象とする。なお、当面、空力不安定振動の問題を対象から除外するため、対象とする風速範囲は共振風速以下とする。併せて、その場合においても考えられる振動依存風力の問題（通常、正減衰効果を与える）は、安全側の判断としてこれを無視する。

2. 解析方法

まず、風応答は一次モードが卓越し、塑性化による振動形の変化は小さく、また、風直角方向振動と風方向振動は独立とし、振れ振動の影響は小さいと仮定する。これより、解析に用いる建物モデルは、自由度が水平一方向の一質点系モデルとし、質量と外力は、建物の一次振動形が高さに比例した直線モードであると考え、頂部でのモーダル質量とモーダル外力として与える。

復元力特性は図-1に示す Normal Bi-linear 型とし、第一・第二分枝剛性比(α)および第一折点(x_y)をパラメータとする。パラメータの一覧を表-1に示す。表中、 $x_{e,max}$ は弾性応答時の評価時間 10 分における最大応答変位を示し、 x_y の $x_{e,max}$ に対する比を降伏点比(β)としている。以後、本文中の表現は α および β とする。弾性剛性時の固有周期は 3.0 秒、構造減衰は 2.0% とする。

風外力は、正方形平面の外壁面に正対する風向からの風直角方向風力を想定し、「建築物荷重指針・同解説」⁷⁾に示された変動風力のパワースペクトル密度となる模擬風力（データ数 65536）を作成する。図-2に変動風力のパワースペクトル密度を示す。図中横軸は、振動数 (n) を建物の幅 (B) と頂部風速 (U_H) で無次元化した無次元振動数 ($n^* = nB/U_H$) として示す。

風速は、無次元固有振動数 (n_e^*) で 0.15 となるレベルとする。 $n_e^* = 0.15$ は、現在、高層建物に設計上考慮されている最大級の風速にほぼ対応し、高さ $H=120m$ 、幅 $B=30m$ の建物の頂部風速に換算すると $U_H=66.7m/s$ （東京、地表面粗度区分 II で再現期間約 800 年）となる。

応答解析法は、線形加速度法による直接積分とし、時間刻みは風力データを直線補間で 4 分割し 0.045 秒とする。応答値は、継続時間 196 分間の応答解析より、はじめの部分を除く 190 分の各 10 分間毎のアンサンブル平均を求め、評価時間 10 分の応答値として評価する。但し、この解析において、振動依存風力は考慮しない。

なお、異なる無次元固有振動数の場合についても検討するために、より共振風速に近い場合として $n_e^* = 0.12$ 、

表-1 解析パラメーター

α	0.25, 0.50, 0.75
β	1.00, 0.83, 0.67, 0.50, 0.40, 0.33, 0.25, 0.20

注) α = 第 1、第 2 分枝剛性比
 β = $x_y/x_{e,max}$ (降伏点比)
 $x_{e,max}$ = 弾性系の最大応答変位

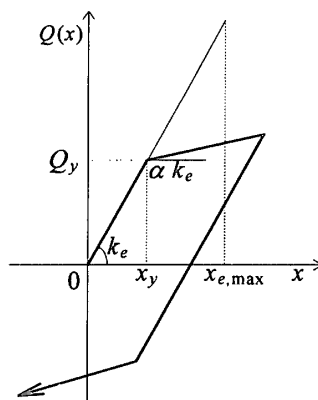


図-1 復元力特性

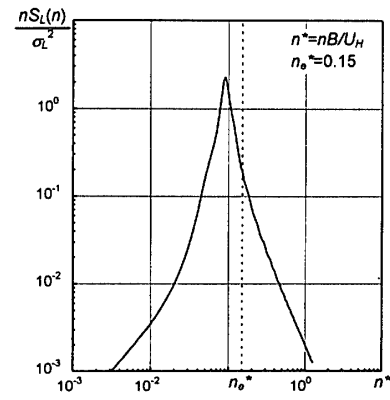


図-2 変動風力のパワースペクトル密度

やや風速の低い場合として $n_e^*=0.20$ の各レベルについても同様の解析を行う。各設定風速に対する弾性応答時変動変位の分散は、外力を固有振動数でのパワースペクトル密度値に等しいホワイトノイズとした場合の分散に比べ、 $n_e^*=0.12$ で 1.14 倍、 $n_e^*=0.15$ で 1.30 倍、 $n_e^*=0.20$ で 1.55 倍となっている。

3. 応答性状

時刻歴応答波形と変位-せん断力関係の一例 ($n_e^*=0.15, \alpha=0.5, \beta=0.5$) を図-3 (a),(b) に示す。平均値であるゼロ点をクロスする間で極値がほぼ一回のみ出

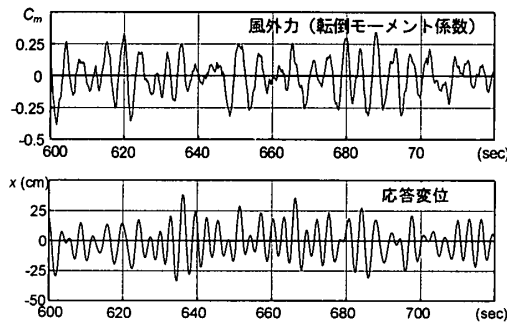


図-3 (a) 時刻歴波形 (風外力、応答変位)

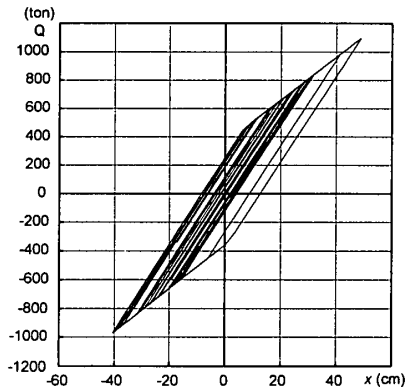


図-3 (b) 変位-せん断力関係

現し出現周期もほぼ等しいことから、時刻歴波形はレベルクロッシング数 (ν) を見かけの振動数とする狭帯域な振動と見なすことができる。

図-4 に β とレベルクロッシング数の関係を示す。図中の縦軸は弾塑性時の値の弾性時に対する比であり、折れ線は 5. で述べる予測値を示している (図-5~7, 9, 11 についても同様)。 β が小さくなるに従いレベルクロッシング数は減少し、塑性化による長周期化の傾向が見られる。この長周期化の傾向は、 α が小さいほど顕著となっている。

図-5 に β と変動変位の標準偏差 (σ) の関係、図-6 に β と最大応答変位 (x_{max}) の関係、図-7 に β とピークファクターの関係を示す。標準偏差は、 β が小さくなるに従い減少し、 β が 0.4 付近で極小値を示す。 α による影響は、 β が 0.4 以上では顕著な差異は認められず、 β が 0.4 以下の範囲では α が小さいほど大きな標準偏差となる傾向を示している。最大応答変位は、標準偏差とほぼ同様の傾向を示すが、極小点の β が 0.5 付近とやや大きめの範囲にあり、極小点を示す β 以下での増加傾向も急激となっている。

図-8 に、変動変位がゼロクロス間で出現した絶対値

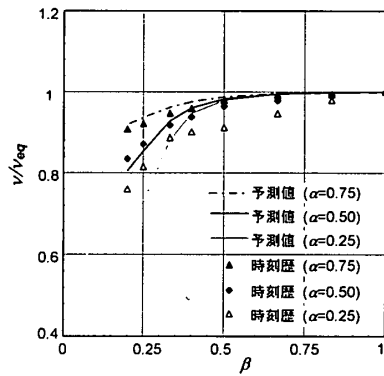


図-4 レベルクロッシング数比
($n_e^*=0.15, \alpha=0.25\sim0.75$, 予測値を含む)

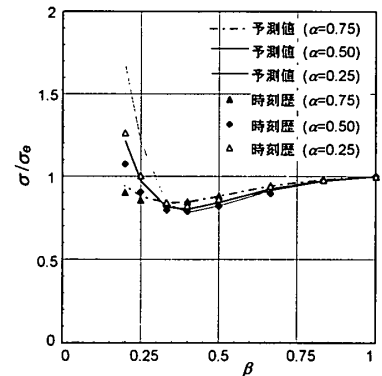


図-5 変動変位の標準偏差比
($n_e^*=0.15, \alpha=0.25\sim0.75$, 予測値を含む)

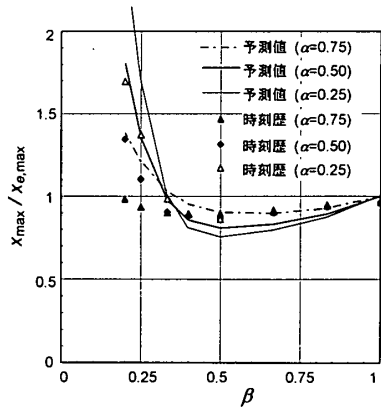


図-6 最大応答変位比
($n_e^*=0.15, \alpha=0.25\sim0.75$, 予測値を含む)

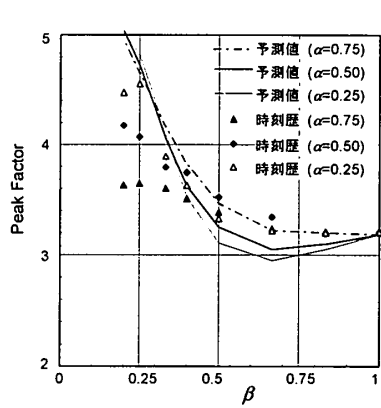


図-7 ピークファクター
($n_e^*=0.15, \alpha=0.25\sim0.75$, 予測値を含む)

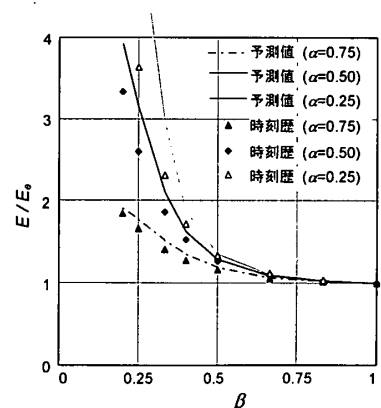


図-9 入力エネルギー比 (10 分間)
($n_e^*=0.15, \alpha=0.25\sim0.75$, 予測値を含む)

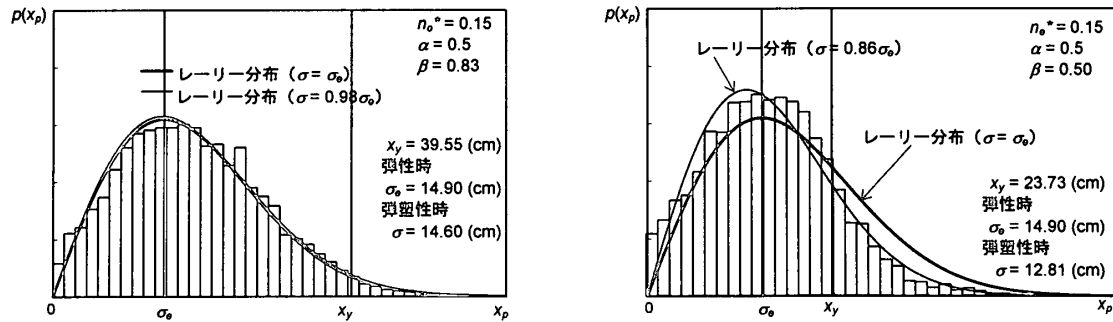


図-8 ゼロクロスピーク値分布 ($\alpha=0.5, \beta=0.83, 0.5$)

最大 x_p (以後、ゼロクロスピークと呼ぶ) の確率密度の例を示す。図中の曲線は、弾性応答の極値分布に用いられる(3.1)式のレーリー分布を適用した場合を示し、 β が小さくなるとレーリー分布との適合が悪くなっている。

$$p(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.1)$$

図-9 に β と 10 分間に入力されたエネルギー量の関係を示す。 β が低下するに従い、塑性化による長周期化並びに履歴による減衰の増大により、入力エネルギー量は増加している。増加の傾向は β が 0.5 以下で顕著となっており、 α が小さいほど増加量は大きい。

図-10 に β と 10 分間に消費された各エネルギー量の関係の例を示す。図中 E_h は粘性減衰による吸収エネルギーを、 E_p は履歴による吸収エネルギーを、 E_{all} は総入力エネルギー (E_h と E_p の和) を、 E_e は弾性応答時の総入力エネルギーを示す。又、折れ線は時刻歴応答解析で得られたゼロクロスピーク値分布を用いて後に示す(4.2), (4.3)式に代入し、10 分間のゼロクロスピーク数を乗じて計算されたエネルギーを示す。その際、ゼロクロスピークは正側と負側で対称に生じ、全てのピークは骨格曲線上にあり、見かけ上レベルクロッシング数で振動していると仮定した。両者の値は良い対応を示している。

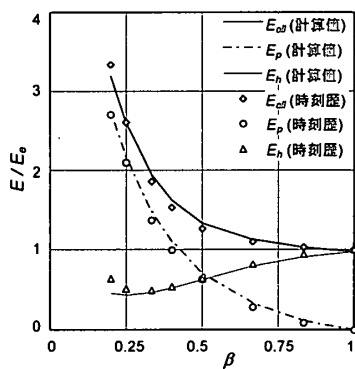


図-10 入力エネルギー比 (10 分間)
($n_0^*=0.15, \alpha=0.5, x_p$ からの計算値を含む)

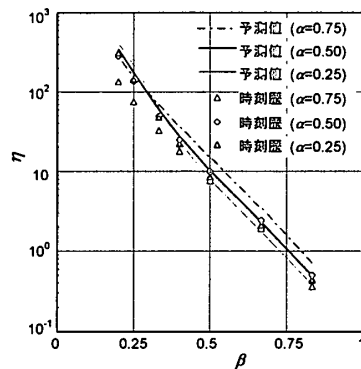


図-11 累積塑性変形倍率
($n_0^*=0.15, \alpha=0.25\sim 0.75$, 予測値を含む)

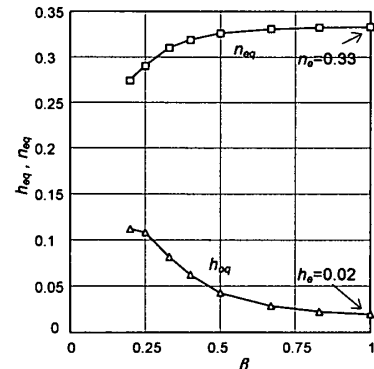


図-12 等価固有振動数、等価減衰定数
($n_0^*=0.15$)

図-11 に、 β と(3.2)式により算定した 10 分間の累積塑性変形倍率 η の関係を示す。

$$\eta = \frac{E_p}{2(1-\alpha)Q_y x_y} \quad (3.2)$$

図の縦軸は対数軸となっており、 β の減少に伴い η は指数関数的に急増することを示している。

これらの解析結果より、弾塑性構造物の風直角方向風力による風応答に関して以下の諸点が明らかとなった。

1. 塑性化によって長周期化し、入力エネルギーは増加する。
2. 履歴減衰による振動抑制により、応答変位は β が 0.4 以上の範囲では弾性応答以下におさまる。
3. ゼロクロスピーク値分布は、 β の減少に従ってレーリー分布との適合が悪くなる。
4. ゼロクロスピーク値分布とレベルクロッシング数を用いて、粘性減衰および履歴減衰による吸収エネルギーの計算が可能である。

4. 等価線形化法による応答との比較

弾塑性構造物の構造特性を等価剛性 (k_{eq}) と等価減衰定数 (h_{eq}) で表現する等価線形系に置換できるとすると、その応答は時刻歴応答解析によらず確率統計的手法に

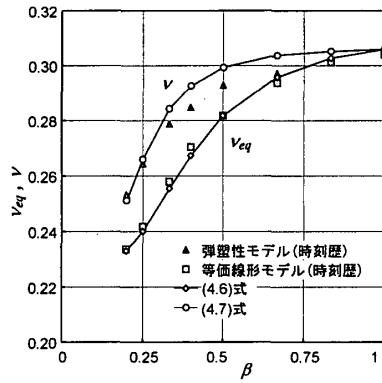


図-13 レベルクロッシング数

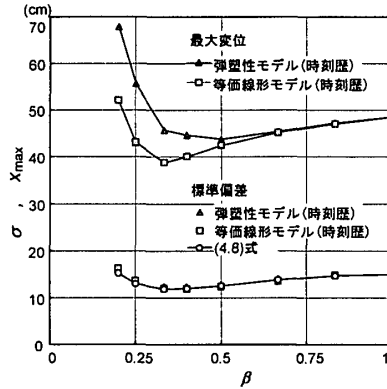


図-14 標準偏差及び最大変位

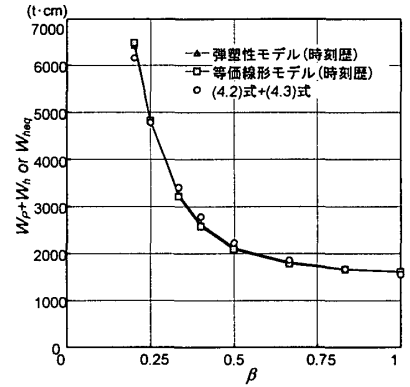


図-15 消費エネルギー (1 サイクル)

より予測可能となる。そこで、 $n_e^* = 0.15$ 、 $\alpha = 0.5$ の場合について、時刻歴応答解析より求められたゼロクロスピーク値分布を用いた等価線形化を行い、その応答と弾塑性応答の比較を行う。

等価線形化は以下の手法による。

Step 1. 弾塑性系の 1 サイクル当たりの歪みエネルギー W_0 、履歴吸収エネルギー W_p 、粘性吸収エネルギー W_h の期待値を次式により求める。

$$W_0 = \frac{1}{N} \cdot \frac{1}{2} \sum \{Q_{pi} \cdot x_{pi}\} \quad (4.1)$$

$$W_p = \frac{1}{N} \cdot 4 \cdot (1 - \alpha) \cdot Q_y \sum_{x_{pi} > x_y} \{(x_{pi} - x_y)\} \quad (4.2)$$

$$W_h = \frac{1}{N} \cdot 2\pi \cdot k_e \cdot h_e \cdot \frac{v}{n_e} \left[\sum_{x_{pi} \leq x_y} x_{pi}^2 + \sum_{x_{pi} > x_y} \{\alpha^2 x_{pi}^2 + (1 - \alpha^2) \cdot (2x_{pi} \cdot x_y - x_y^2)\} \right] \quad (4.3)$$

但し、 N はゼロクロスピーク数、 x_{pi} は各ゼロクロスピーク、 Q_{pi} は各 x_{pi} に対応する骨格曲線上の Q 値を表す。また、(4.3)式中の第二項は、 x_y 以上のゼロクロスピークに対してエネルギー等置により等価な弾性変形量に変換されたゼロクロスピーク値の二乗和を表している。

Step 2. 等価線形系の 1 サイクル当たりの歪みエネルギー W_{0eq} 、粘性吸収エネルギー W_{heq} の期待値を次式により求める。

$$W_{0eq} = \frac{1}{N} \cdot \frac{1}{2} \sum \{k_{eq} \cdot x_{pi}^2\} \quad (4.4)$$

$$W_{heq} = \frac{1}{N} \cdot 2\pi \cdot k_{eq} \cdot h_{eq} \cdot \frac{v_{eq}}{n_{eq}} \sum x_{pi}^2 \quad (4.5)$$

ここで、 v_{eq} は未知数であるから便宜的に弾塑性応答解析結果の v を用いる。

Step 3. $W_{0eq} = W_0$ 、 $W_{heq} = W_p + W_h$ を満たす等価剛性 k_{eq} 、等価減衰定数 h_{eq} を求める。

以上の手順により求められた等価固有振動数並びに等価減衰定数と β の関係を図-12 に示す。等価線形系モデルの時刻歴応答解析を行い、弾塑性応答解析結果との比較を図-13~15 に示す。

図-13 に、 β とレベルクロッシング数の関係を、(4.6)、(4.7)式による計算値と共に示す。

$$v_{eq} = \sqrt{\frac{\int_0^\infty n^2 \cdot |\chi(n; n_{eq}, h_{eq})|^2 \cdot S_L(n) dn}{\int_0^\infty |\chi(n; n_{eq}, h_{eq})|^2 \cdot S_L(n) dn}} \quad (4.6)$$

$$v = \frac{n_{eq}}{n_e} \cdot v_e \quad (4.7)$$

但し、 $\chi(n; n_{eq}, h_{eq})$ は等価線形系の力学的アドミッタンス、 S_L は風力のパワースペクトル密度、 n_e は弾性時の固有振動数、 n_{eq} は等価線形系の固有振動数を示す。

等価線形系の解析結果と(4.6)式による計算値は良い一致を示し、弾塑性系の解析結果に比べ小さめの値を示している。(4.7)式による計算値は、やや大きめの値となっているが、弾塑性系の応答解析結果をほぼ近似している。

図-14 に変動変位の標準偏差および最大値の比較を、図-15 に 1 サイクル当たりの消費エネルギーの比較を、弾塑性応答解析結果のゼロクロスピークを用いてそれぞれ(4.8)式、(4.2)、(4.3)式より求めた計算値と共に示す。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2N} \cdot \sum x_{pi}^2} \quad (4.8)$$

等価線形系の応答解析結果は、標準偏差、1 サイクル当たりの消費エネルギーとも弾塑性系の応答解析結果、および(4.8)式、(4.2)、(4.3)式による計算値と良い一致を示している。等価線形系の最大応答変位は弾塑性系に比べ小さめの応答を示し、 β が小さな範囲でその傾向は顕著となっている。これは、弾塑性系のゼロクロスピーク

クがレーリー分布との適合が悪くなることと、レベルクロッシング数が異なるためと考えられる。これらの結果より、以下の諸点が明らかとなった。

1. ゼロクロスピーク値分布を用いた等価線形化モデルの応答より、弾塑性応答の変動変位の標準偏差および1サイクル当たりの消費エネルギーが予測可能である。
2. 弾塑性応答時のレベルクロッシング数は等価線形化モデルの応答時に比べ大きく、(4.7)式によってほぼ予測可能である。

5. 応答予測手法とその適用性の検討

5.1. 応答予測手法

予測法のフローを図-16に示す。本予測法では、まず弾塑性系のゼロクロスピークの確率密度関数 $p(x)$ を仮定し、 $p(x)$ より算定される1サイクル当たりの消費エネルギー量 $W_p + W_h$ と等価線形系 (n_{eq}, h_{eq}) に予測される消費エネルギー量 W_{eq} が等しくなる点を求める。その後、求められた分布より弾塑性応答量の計算を行う。

Step 1. 弾性応答量の計算

弾性応答変位の標準偏差 σ_e 、レベルクロッシング数 ν_e を、(5.1)、(4.6)式に固有振動数 n_e 、減衰定数 h_e を代入して求める。ゼロクロスピーク値分布はレーリー分布と仮定する。

$$\sigma_e^2 = \int_0^\infty |\chi_e(n; n_e, h_e)|^2 \cdot S_L(n) dn \quad (5.1)$$

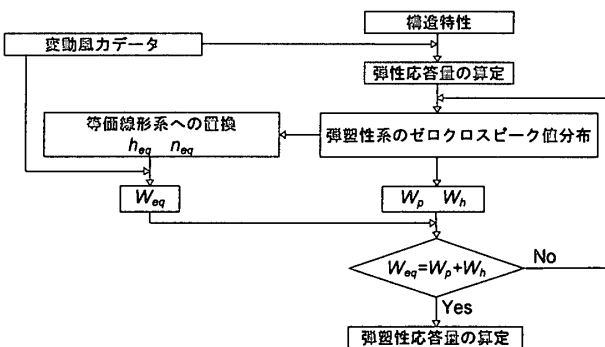


図-16 弾塑性応答の予測フロー

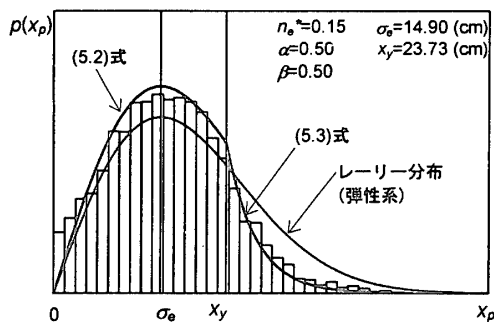


図-17 ゼロクロスピーク値分布の確率密度関数

Step 2. ピーク値分布の設定

時刻歴応答解析結果をもとに、応答変位のゼロクロスピーク値分布を降伏変位 x_y を境に別々の確率密度関数で与えることとする。即ち、 $0 \leq x_p \leq x_y$ の範囲では、弾性応答の標準偏差 σ_e を用いたレーリー分布の相似形と仮定し(5.2)式で与え、 $x_y < x_p < \infty$ の範囲では指数分布(付録1参照)を用いて(5.3)式で表す。但し、 $x_p = x_y$ における(5.2)、(5.3)式の連続性より(5.4)式が課せられる。

$$p(x_p) = r \cdot \frac{x_p}{\sigma_e^2} \exp\left\{-\frac{x_p^2}{2\sigma_e^2}\right\} \quad (0 \leq x_p \leq x_y) \quad (5.2)$$

$$p(x_p) = \lambda \exp\{-\lambda \cdot \zeta \cdot (x_p - x_y)\} \quad (x_y < x_p < \infty) \quad (5.3)$$

$$\lambda = \frac{2r \cdot \varepsilon \cdot e^{-\varepsilon}}{x_y}, \quad \zeta = \frac{1}{1-r(1-e^{-\varepsilon})}, \quad \varepsilon = \frac{x_y^2}{2\sigma_e^2} \quad (5.4)$$

図-17に $\alpha=0.5$ 、 $\beta=0.5$ の予測式と弾性時のレーリー分布を応答解析結果と共に示す。

Step 3. 弾塑性系の消費エネルギーの計算および

等価線形系への置換と消費エネルギーの計算

r を仮定して、Step 2. によるゼロクロスピーク値分布を確定し、弾塑性系および等価線形系の消費エネルギーを計算する。

弾塑性系については(4.2)、(4.3)式より直ちに求まる。他方、等価線形系については、先ず、4. と同様の等価線形化を行い、 k_{eq} 、 h_{eq} 、 n_{eq} を求める。その際、(4.1)~(4.5)式中の x_{pi} の出現頻度を(5.2)、(5.3)式の $p(x_p)$ と応答の評価時間 (T) により $\nu \cdot T \cdot p(x_p)$ へと置換し、(4.3)、(4.5)式中の ν は(4.7)式を準用する。

次に、等価線形系の応答の標準偏差 σ_{eq} を(5.1)式の k_e 、 h_e に k_{eq} 、 h_{eq} を代入して求め、1サイクル当たりの消費エネルギー W_{eq} の期待値を(5.5)式により求める。

$$W_{eq} = 4\pi \cdot k_{eq} \cdot h_{eq} \cdot \sigma_{eq}^2 \cdot (\nu_{eq} / n_{eq}) \quad (5.5)$$

但し、 ν_{eq} は(4.5)式と同様に(4.7)式の ν を準用する。

なお、(4.5)、(5.5)式中の ν_{eq} を等価線形化の際に収斂計算によって求める方法もあるが、計算の煩雑さを避け簡略化した。

そして、両系のエネルギーが釣り合う場合、即ち、 $W_p + W_h = W_{eq}$ が成立する(5.2)~(5.4)式中の r を求め、弾塑性系のゼロクロスピーク値分布を決定する。

Step 4. 最大応答変位の計算

Step 3. で確定した弾塑性系でのゼロクロスピーク値分布の確率密度関数より、評価時間 10 分間での最大応答変位の期待値を(5.6)式より求める¹¹⁾。

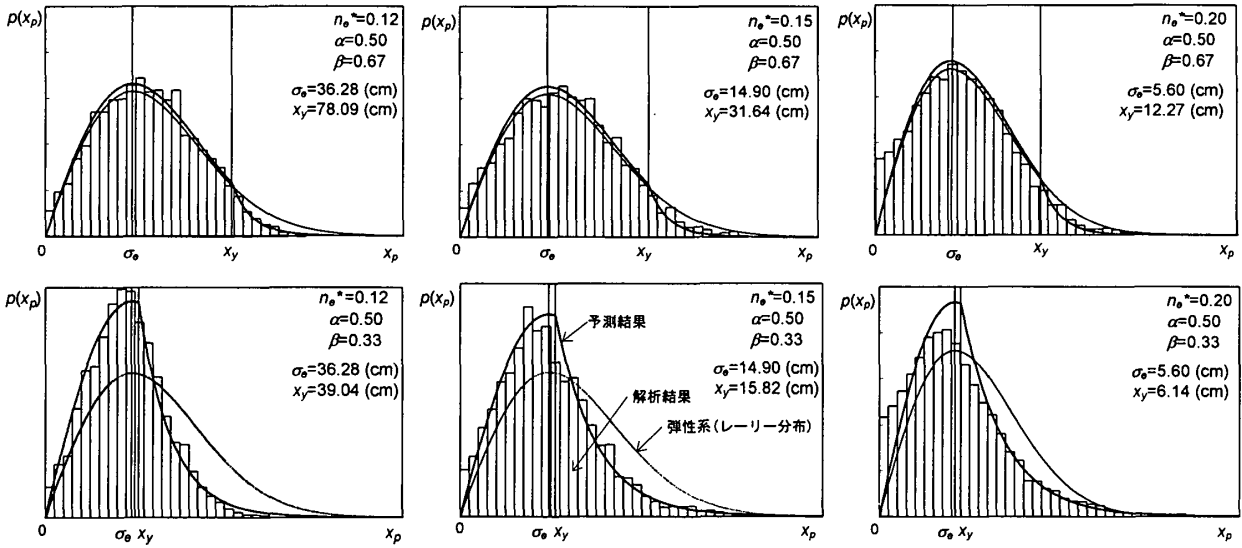


図-18 ゼロクロスピーク値分布 ($n_e^*=0.12, 0.15, 0.20, \alpha=0.5, \beta=0.67, 0.33$, 予測結果を含む)

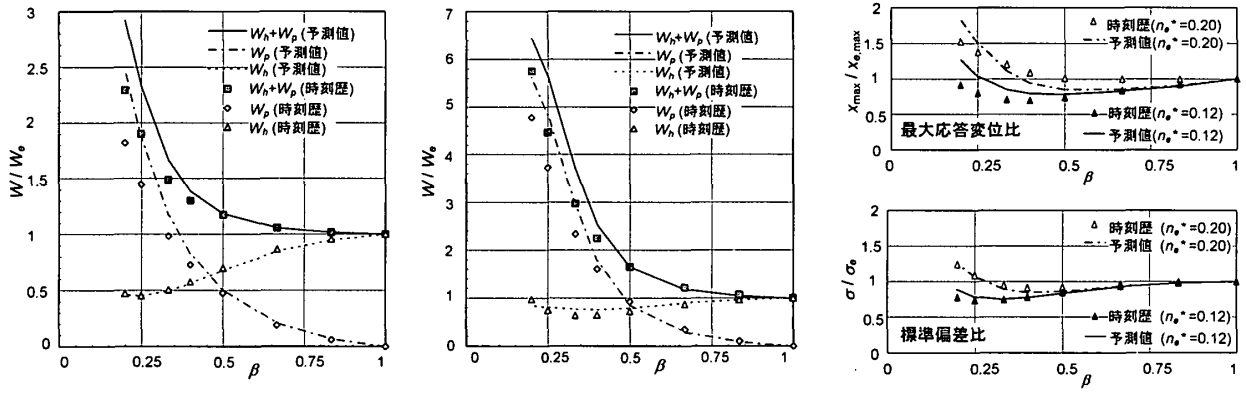


図-19 1サイクルの入力エネルギー比 ($\alpha=0.5$, 予測値を含む)

図-20 最大変位及び標準偏差の比較 ($n_e^*=0.12, 0.20, \alpha=0.5$, 予測値を含む)

$$\bar{x}_{max} = \int_0^{\infty} x \cdot p_{max}(x) dx \quad (5.6)$$

$$\text{但し、} p_{max}(x) = N \cdot \{1 - q(x)\}^{N-1} p(x),$$

$$q(x) = \int_x^{\infty} p(\xi) d\xi, \quad N = 600\nu$$

5.2. 時刻歴応答解析との比較

ゼロクロスピーク値分布： 図-18 にゼロクロスピーク値分布の例として $n_e^*=0.12, 0.15, 0.20, \alpha=0.5, \beta=0.67, 0.33$ の場合を、時刻歴応答解析結果のヒストグラムと予測結果のカーブを弾性時のレーリー分布と共に示す。図より、(5.2)~(5.4)式で示された予測結果は $n_e^*=0.20$ の σ_e 付近での頻度が多少高めではあるが時刻歴応答解析結果をよく近似していると考えられる。

入力エネルギー： $n_e^*=0.15$ での10分間に入力されたエネルギー量を図-9に示す。 $\beta \leq 0.4$ で予測値は時刻歴応答解析結果よりやや大きめの値となるが全体により近い近似を与えている。図-19に示す $n_e^*=0.12, 0.20, \alpha=0.5$

の1サイクル当たりの入力エネルギーも、 $n_e^*=0.15$ と同様の傾向となり、 $\beta \leq 0.4$ での履歴吸収エネルギーは多少大きめの評価となっている。

変動変位の標準偏差： $n_e^*=0.15$ の場合を図-5に弾性時との比として、 $n_e^*=0.12, 0.20$ の場合をその絶対値で図-20に示す。 $\beta \leq 0.25$ で予測値は時刻歴応答解析結果よりやや大きめの値となる以外はよい近似を与え、 β との全体的な傾向をよく表している。

最大変位： $n_e^*=0.15$ の場合を図-6に弾性時との比として示す。 $\beta \leq 0.33$ で予測値は時刻歴応答解析結果よりやや大きめの、 $\beta \geq 0.4$ でやや小さめの値となり、 α が小さいほどその傾向は強い。 $\beta=0.67$ での予測値は $\alpha=0.75, 0.5, 0.25$ でそれぞれ時刻歴応答解析結果の0.98, 0.92, 0.88倍となっている。 $n_e^*=0.12, 0.20, \alpha=0.5$ の場合をその絶対値で図-20に示す。 $n_e^*=0.12$ では、予測値は全域に渡り時刻歴応答解析結果よりやや大きめの値となっている。 $n_e^*=0.20$ では、 $n_e^*=0.15$ の場合と同様の傾向となるが時刻歴応答解析結果との差は多少大き

くなっている。

これらの予測値と時刻歴応答解析結果の比較より以下の諸点が明らかとなった。

1. ゼロクロスピーク値分布は(5.2)~(5.4)式で近似する事ができる。
2. 入力エネルギー、変動変位の標準偏差は $\beta \geq 0.4$ の範囲において本予測手法によって予測可能である。
3. 最大応答変位の予測値は、時刻歴応答解析の降伏変位に対する傾向を良く表しているが、絶対量において多少小さ目めの値を示す場合もある。

6. 結び

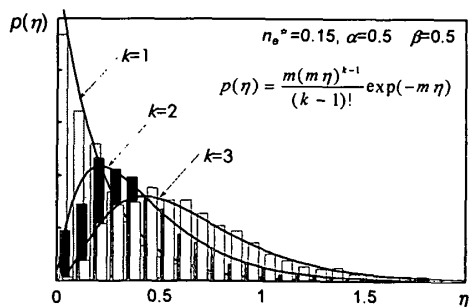
平均風力を有さずパワーが比較的特定周波数に集中することが多い風直角方向風力を対象とした弾塑性構造物の応答性状を把握し、確率統計的手法による応答予測手法とその適用性を提示した。得られた知見は3、4、5の各項にそれぞれとりまとめたが、要約すると次の通りである。

1. 弾塑性応答時には、塑性化による長周期化の影響により弾性応答時に比べ入力エネルギーは増加するが、弾性応答以下の応答変位におさまる降伏点比(β)の範囲が存在する。
2. 弾塑性応答における消費エネルギーは、ゼロクロスピーク値分布とレベルクロッシング数を用いて算定でき、そのゼロクロスピーク値分布は降伏変位 x_y を境に別々の確率密度関数で近似する事ができる。
3. 弾塑性応答における変動変位の標準偏差および消費エネルギーは、ゼロクロスピーク値分布からの等価線形化モデルを用いて予測可能である。
4. 弾塑性応答時の消費エネルギー、変動変位、変動振幅の分布は2、3の特性を利用して確率統計的手法により予測可能である。

しかしながら、塑性化を考慮した耐風設計や想定以上の風速時における耐風安全性の検討を行うためには、風応答性状に限っても平均値を有する風力、パワーが広い周波数範囲の風力、風向風速変化の影響等の多くの事項を明らかにしていく必要があり、今後の研究課題である。

付録1

ある事象の発生が時間軸上でポアソン過程を構成する時、事象が k 回発生するまでの時間はガンマ分布に従う。弾塑性応答において累積塑性変形量を時間軸として塑性化の発生がポアソン過程に従うと仮定すると、 k 回目の塑性化までの塑性変形量の合計はガンマ分布となり、 $k=1$ の場合は指数分布となる。付図-1は弾塑性応答解析結果より、 $k=1, 2, 3$ とした場合における塑性変形量の合計を求めた例であり、ガンマ分布とよく適合することを示している。



付図-1 塑性変形の確率密度分布 ($k=1, 2, 3$)

参考文献

- 1) 山崎真司、山田周平、澤田昇次、塚谷秀範：みなとみらい21ランドマークタワーの耐風設計（その1~3），日本建築学会大会学術講演梗概集，1990.10
- 2) 福本敏之、小堀鐸二、石井孝二、山田俊一、前田祥三：ハニカム開口を有する鋼板ダンパに関する研究（その1~6），日本建築学会大会学術講演梗概集，1989.10~1992.8
- 3) 泉 満、可児長英、成原弘之、小倉桂治、川又康博、細沢 治：極低降伏点鋼材を用いたせん断降伏型制振部材の低サイクル疲労実験（その1~4），日本建築学会大会学術講演梗概集，1992.8、1993.9
- 4) 中村庄滋、寺田岳彦、真瀬伸治、中村康一、石川二巳徳、宇野寿郎：鋼管の振れ降伏を利用した弾塑性ダンパに関する研究（その1~2），日本建築学会大会学術講演梗概集，1993.9
- 5) A.G.Davenport：The Application of Statistical Concept to the Wind Loading of Structures, Proc.Ins.Civil Engrs. Vol.19,1961
- 6) A.G.Davenport：Gust Loading Factors, Proc.ASCE, Vol.93,ST 3,June,1967
- 7) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，1993
- 8) 成原弘之、泉 満、浅見 豊：風荷重に対する高層鋼構造骨組の疲労設計，日本建築学会構造系論文報告集第465号，1994
- 9) B.J.Vickery：WIND ACTION ON SIMPLE YIELDING STRUCTURE, Journal of the ENGINEERING MECHANICS DIVISION Proc. of the ASCE, April 1970
- 10) 秋山 宏、中山昌尚：高層建築物のパフェッティング振動に関する時刻歴応答解析，日本風工学会誌第38号，1989.1
- 11) 岡内 功、伊藤 學、宮田利雄：耐風構造，丸善，1977
- 12) 辻田 修、大熊武司、早部安弘、浅見 豊：弾塑性風応答の予測 平均値がゼロの場合（その1~2），日本建築学会大会学術講演梗概集，1994.9

(1995年9月10日原稿受理，1995年11月13日採用決定)