

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2 風方向振動の場合

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

Part 2. A case of along-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

For tall buildings and for buildings in which response control systems by hysteretic damping of steel are installed, it is important to understand inelastic response characteristics of buildings under wind loading. Inelastic response characteristics and response prediction method under across-wind loading were reported in the previous paper, Part 1. But, from the nature of across-wind loading, it was not confirmed how the mean wind loading and the low frequency component in wind force have an effect on the inelastic response.

In this paper, inelastic response characteristics, e.g. the transition of the mean displacement, the distribution of the fluctuating displacement, the maximum fluctuating displacement, the absorbed energy and so on, under along-wind loading are investigated through time history response analyses by using a single-degree-of-freedom system. And, a stochastic method of estimating the inelastic response under along-wind loading, by extending the method for across-wind vibration, is proposed.

keywords : wind force, along-wind vibration, inelastic response, mean displacement, peak-value distribution, energy input

風外力、風方向振動、弾塑性応答、平均変位、ピーク値分布、入力エネルギー

1. 序

前報¹⁾「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」では、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範囲内に留めるこれまでの耐風設計において、矩形平面を有する高層建築物の場合に構造部材を決定する上で支配的な荷重となることの多い風直角方向風力に対する弾塑性構造物の風応答性状とその確率統計的予測手法について述べた。

しかし、前報で対象とした風直角方向振動は、風力に平均成分がほとんど無く比較的狭い振動数範囲の変動風力に対する応答であることから、風力に含まれる平均成分や低振動数成分の弾塑性応答に与える影響は把握されていない。したがって、風力に平均成分を有しかつ低振動数成分を中心に広い範囲でパワーを有する変動風力に対する振動である風方向振動に関する弾塑性応答性状の定量的把握と応答予測が必要である。

本報告では、簡略化したモデルを用いた時刻歴応答解

析結果より、風方向風力に対する平均変位の推移、最大変位、変動変位振幅の分布などの弾塑性応答性状をエネルギー的な考察を加えながら明らかにし、平均風力と変動風力のパワースペクトル密度を風外力の情報として用いた確率統計的手法による弾塑性応答の予測手法を提示する。

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、風方向振動と風直角方向振動は独立とし、ねじ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する。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。

風方向風力は建物規模と平均風速の鉛直分布の影響を受けるため、以下の建物諸元を設定する。建物規模は、矩形平面を有する高さ $H=200\text{m}$ 、幅 $B=50\text{m}$ 、奥行き

本論文は文献4)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.

$D=40\text{m}$ 、地上部重量 $W=66000\text{ton}$ とし、弾性剛性時の固有周期は 5.0 秒、構造減衰は 2.0% とする。平均風速は高さのべき乗に比例して増大するとし、べき指数は 0.27 (「建築物荷重指針・同解説」²⁾による地表面粗度区分IVの場合) とする。

解析モデルの復元力特性は図-1 に示す Normal Bilinear 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。

風外力は、外壁面に正対する風向からの風方向風力を想定し、「荷重指針」に示された平均風力並びに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 32768) を 10 波作成する。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 ($n^* = n \cdot B / U_H$) として示す。変動風力の標準偏差 (σ_p) と平均風力 (\bar{P}) の比である変動係数 (σ_p / \bar{P}) は 0.171 である。

風速は、無次元固有振動数 (n_e^*) で 0.165 となるレベルとする。 $n_e^*=0.165$ 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、想定建物の頂部風速に換算すると $U_H=60.5\text{m/s}$ (東京、地表面粗度区分IVで再現期間約 1000 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 8 分割し 0.031 秒とする。応答値は、模擬風力 10 波 (wind1~10) に対する継続時間各 135 分間の応答解析より、模擬風力に正弦波補正を行ったはじめの 1.0 分を除く 130 分の各 10 分間毎に 10 波のアンサンブル平均を求め、評価時間 10 分の各時刻 (パート) における応答値として評価する。ただし、この解析において、振動依存風力 (空力弾性力、空力減衰力) は考慮しない。

3. 応答性状

弾性時のガスト影響係数 (評価時間 10 分における最大値の平均値に対する比) は 1.99 である。従って、 $\beta \geq 0.5$ の範囲は弾性時の平均変位および最大変動変位がともに降伏変位よりも小さい範囲に相当する。

時刻歴応答変位波形と変位-せん断力関係の一例 (wind5、 $\alpha=0.5$ 、 $\beta=0.3, 0.6$) を図-3(a),(b) に示す。

図-3(a)中に、時刻歴応答 $x(t)$ をフーリエ変換により $n_{Bound}=n_e/2$ を境に固有振動数成分 (添字 N) と低振動数成分 (添字 L) とに分離し、分離された各々のフーリエ・

表-1 解析パラメータ

| | | | | | |
|----------|-----|-----|-----|---------|-----|
| α | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 |
| β | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 |
| | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 1.0(弾性) | |

β : 降伏点比 $\left(= \frac{x_y}{x_{e,max}} \right)$

$x_{e,max}$: 弾性応答変位の最大値

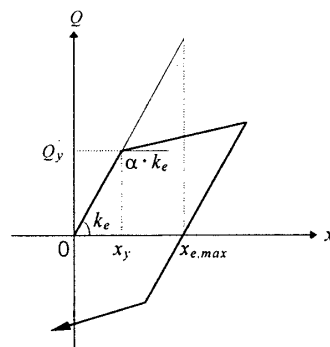


図-1 復元力特性

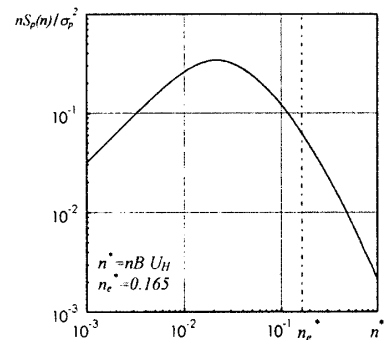


図-2 変動風力のパワースペクトル密度

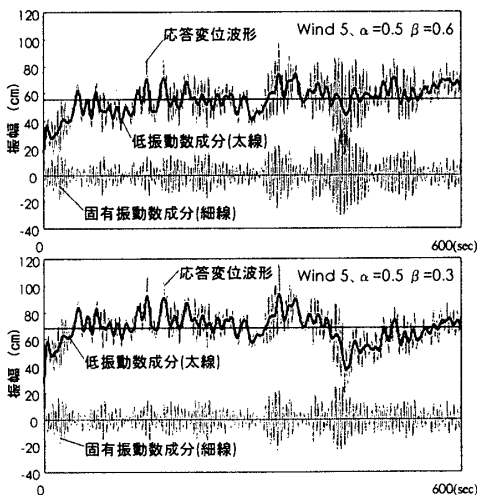


図-3(a) 時刻歴応答変位波形

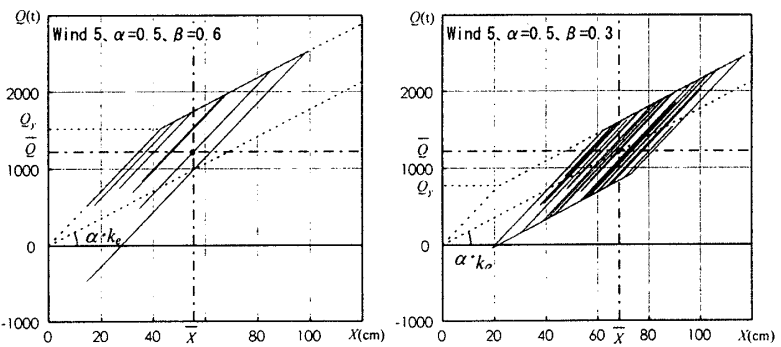


図-3(b) 変位-せん断力関係

スペクトルから逆フーリエ変換で作成した時刻歴応答 $x_N(t)$ と $x_L(t)$ を示す。両図より、 $\beta=0.6$ と $\beta=0.3$ では応答性状が異なっていることが分かる。変位-せん断力関係では、 $\beta=0.6$ の場合には塑性化は正側にのみ生じ履歴ループを描かず、 $\beta=0.3$ の場合には平均変位と平均せん断力の交点周りに正負ほぼ対称に塑性化が生じる。時刻歴応答変位波形では、低振動数成分の影響を強く受けて平均変位をクロスする間に複数の極値が出現している。この傾向は、固有振動数成分が小さな応答を示す $\beta=0.3$ の場合に顕著である。

図-4 に β と変位の標準偏差 (σ) の関係、図-5 に β とピークファクターの関係を示す。変動変位は、各パートの 10 分間平均変位からの変動とし、10 波 13 パートのアンサンブル平均である。図-4 の縦軸は弾塑性応答時の値の弾性応答時の値に対する比として示す。両図より、 $\beta \geq 0.5$ の範囲では弾性応答と同等の変動変位を示すことが判る。 $\beta < 0.5$ の範囲では変位の標準偏差は β の減少に伴い α の影響を受けて、 α が小さい場合は増加傾向、 α が大きい場合は減少傾向となる。ピークファクターには α の影響はあまり見られず、 $\beta < 0.5$ の範囲で β の減少に伴い増加する傾向にある。

図-6 に、変動変位が各パートの平均変位をクロスする間に出現した絶対値最大 x_p (以後、ゼロクロスピークと呼ぶ) の確率密度の例 (wind5, $\alpha=0.5$, $\beta=0.2, 0.3, 0.6, 1.0$) を示す。図中の曲線は、狭帯域定常確率過程と仮定して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す。 $\beta=0.6$ の場合は弾性とほぼ同じ形状と見ることができ、確率密度関数にレーリー分布の適用が可能と判断されるが、降伏点比が低くなるにつれてレーリー分布での近似が悪くなる。

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

図-7 に 13 パート中 6 パート目の最大応答変位を弾性応答時に対する比として示す。 $\beta \geq 0.5$ の範囲では、最大応答変位は β の減少に伴い直線的に増大し、 α が小

さいほど大きな値となっている。この範囲で変動変位は弾性時と同等の値を示すことから、最大応答変位の変化は平均変位の変化を表わしている。 β が 0.2 から 0.4 の範囲で最大応答変位は、 β によらずほぼ一定の値となり、 α が小さいほど大きな値となっている。 $\beta=0.4$ での最大変動変位は図-4, 5 より α に寄らず同程度の値であることから、 α が小さくなるに従いこの範囲での最大応答変位に占める平均変位の割合が大きくなることが判る。

図-8 に時間の経過による変位応答量の移動状況の例 (10 波平均, $\alpha=0.5$, $\beta=0.3, 0.6, 1.0$) を示す。 $\beta=0.6$ の場合では、時間の経過とともに平均変位が移動し、それに伴い最大変位も増大している。 $\beta=0.3$ の場合では、平均変位、最大変位とも最初の 10 分間からほぼ一定の値を示し、特にその平均変位の値は、平均せん断力と原点からの第 2 分枝剛性との釣り合い点の値と一致している。

図-9 に 10 分間に入力されるエネルギー量を、図-10 にレベルクロッシング数を弾性応答に対する比として示す。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

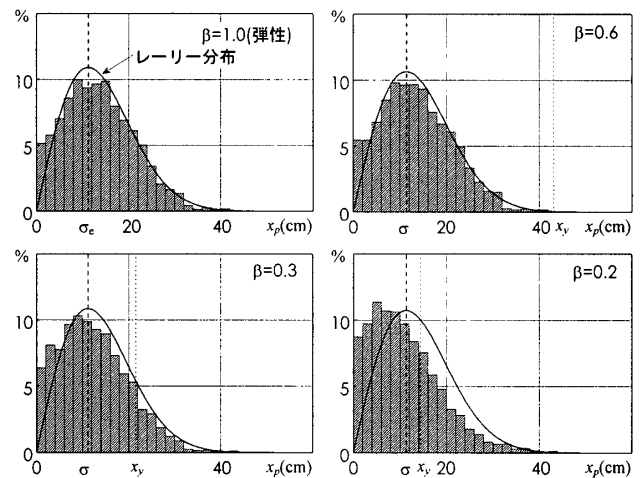


図-6 ゼロクロスピーク値分布 (Wind5, $\alpha=0.5$)

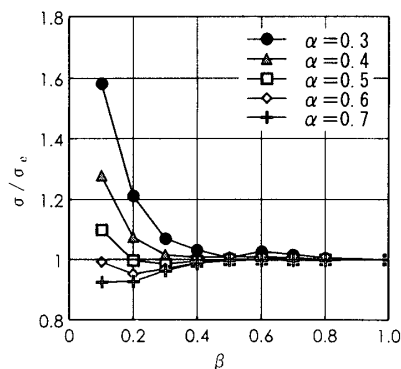


図-4 変位の標準偏差比

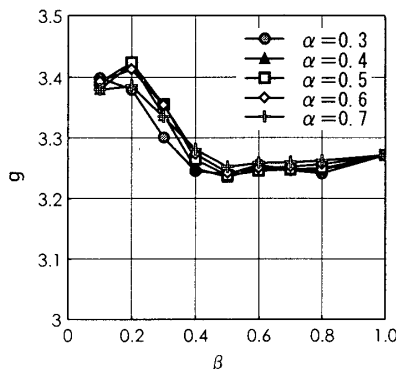


図-5 ピークファクター

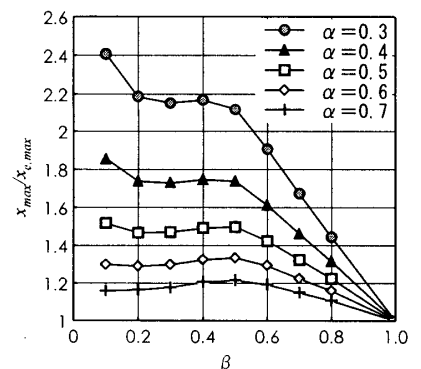


図-7 最大応答変位比

ルギーを示す。 $\beta \geq 0.5$ の範囲では総入力エネルギー、レベルクロッシング数とも弾性応答時と同等の値を示しており、また、履歴減衰による吸収エネルギー E_p の入力エネルギー E_{all} に対する比率も極めて小さい。 $\beta < 0.5$ の範囲では、 β の減少に伴い E_p は急増し、粘性減衰による吸収エネルギー E_h は減少するものの総入力エネルギー E_{all} は増大している。この範囲でレベルクロッシング数も減少し長周期化の傾向が見られる。これらの傾向は、 α が小さいほど顕著である。

図-11 に応答変位の外力に対する伝達関数の例 (wind5, $\alpha=0.5$, $\beta=0.3, 0.6$) を示す。横軸は無次元振動数を示し、縦軸は初期剛性 k_e で無次元化してある。図中には応答解析時間 130 分間のうち、3 箇所での 10 分間の伝達関数を示してある。 $\beta=0.6$ の伝達関数より、塑性化の影響を受けるのは応答の初期の段階であり、10 分間経過後は殆ど弾性時の伝達関数と変わらない事が判る。一方、 $\beta=0.3$ の伝達関数からは、応答解析時間 130 分間に絶えず塑性化している様子が判る。

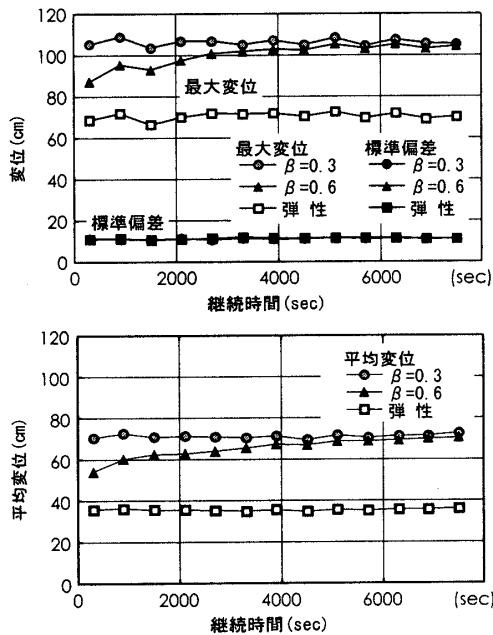


図-8 変位の移動状況 ($\alpha=0.5$)

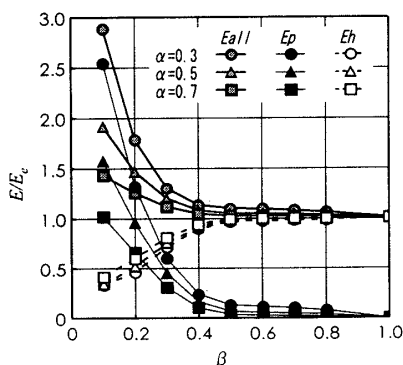


図-9 入力エネルギー比 (10 分間)

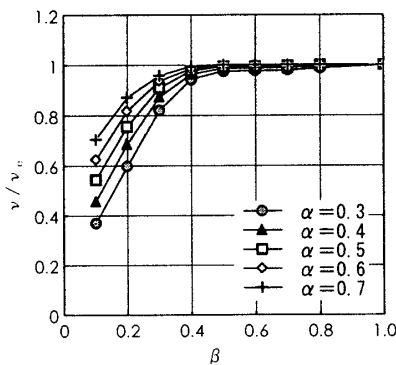


図-10 レベルクロッシング数比

これらの解析結果より、弾塑性構造物の風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. 構造物の降伏点比 β が小さい場合と大きい場合とでは応答性状が異なる。本解析における両者の分岐点は $\beta \approx 0.5$ であり、弾性応答時のガスト影響係数の値 (約 2) に対応する。応答の概念図を図-12 に示す。
2. 降伏点比 β が大きい場合の応答は、時間の経過と共に平均変位が増加するものの、変動変位や入力エネルギーは弾性応答とほぼ同等の値となる。
3. 降伏点比 β が小さい場合の応答は、平均変位が平均せん断力と原点からの第 2 分枝剛性との釣合い点へ素早く移動し、その点回りで履歴ループを描き、塑性化の程度により変動変位や入力エネルギーが変化する。

4. 平均成分の予測手法とその適用性の検討

風方向風力を受ける弾塑性構造物の時刻 t における最大応答変位 X_{max} は、平均変位 $\bar{X}(t)$ と最大変動変位 x_{max} の和として求められる。

$$X_{max} = \bar{X}(t) + x_{max} \quad (4.1)$$

β が大きい場合の x_{max} は、弾性応答時の最大変動変位と同等と考えられ、風力データ (パワースペクトル密度) と構造特性を用いた確率統計的手法により予測可能な値である^{2),3)}。従って、各時刻における平均変位を予測す

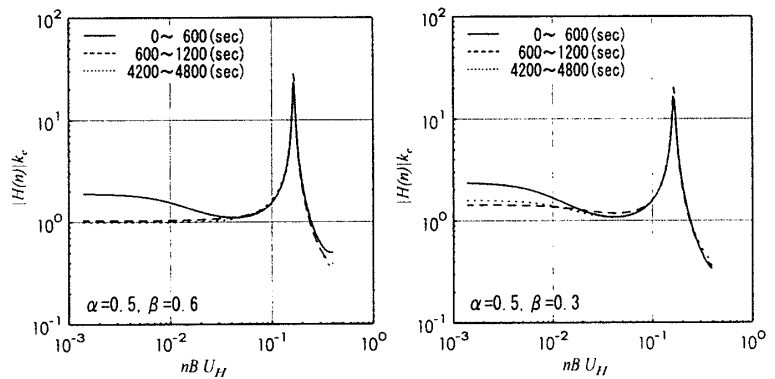


図-11 応答変位の外力に対する伝達関数 (Wind5)

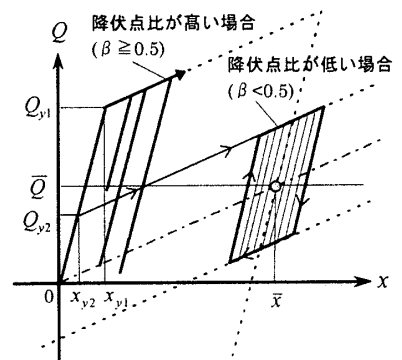


図-12 弾塑性風応答の概念図

ることにより、各時刻における最大応答変位も予測可能となる。 β が小さい場合、平均変位 $\overline{X}(t)$ は平均風力と原点からの第2分枝剛性との釣合い点で一定であることから、変動成分の弾塑性応答予測が問題となる。

以下に β が大きい場合について、ある時刻 T における平均変位 $\overline{X}(T)$ を既知とした場合の、 ΔT 時間後における平均変位 $\overline{X}(T+\Delta T)$ を予測する手法を示す。

Step1. 弾性応答量の算定

弾性系における変動変位の標準偏差 σ_e とレベルクロッシング数 V_e を確率統計的手法により求める。ゼロクロスピーク値分布は、広帯域性を考慮した極値分布を用いることも考えられるが、簡易な関数であるレーリー分布(3.1式)と仮定する。

Step2. 各ゼロクロスピークに対する平均変位推移量の計算 (図-13)

時間間隔 ΔT の中で弾性応答と仮定して求まる変動変位のゼロクロスピーク x'_p が、(4.2)式により求まる平均変位 $\overline{X}(T)$ からの降伏変位量 x'_y を越えた場合は、エネルギー一定則により弾塑性ピーク x_p に置換する。つぎに、骨格曲線上の弾塑性ピーク x_p 点より弾性剛性にて平均せん断力 \overline{Q} との交点を求め、弾性応答のゼロクロスピーク x'_y に対応する平均変位の推移量 $\delta(x'_y)$ を(4.3)式により求める。

$$x'_y = x_y - \frac{\alpha}{1-\alpha} \left(\frac{\overline{Q}}{\alpha k_e} - \overline{X}(T) \right) \quad (4.2)$$

$$\delta(x'_y) = (1-\alpha)(x_p - x'_y) \quad (4.3)$$

Step3. ΔT 時間後の平均変位 $\overline{X}(T+\Delta T)$ の算定

時間間隔 ΔT 後の平均変位 $\overline{X}(T+\Delta T)$ は、弾性時におけるゼロクロスピーク値の確率密度関数 $p(x'_p)$ にレーリー分布を用いて、次式で求める。

$$\overline{X}(T+\Delta T) = \overline{X}(T) + v_e \cdot \Delta T \int_{x'_y}^{\infty} \delta(x'_p) p(x'_p) dx'_p \quad (4.4)$$

予測手法に従って計算した平均変位の推移量の例($\alpha=0.5, \beta=0.6, 0.8$)を、図-14に示す。 $t=0\sim 10$ 分のと

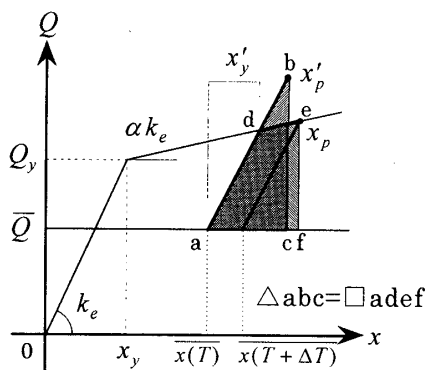


図-13 エネルギー一定則

きの平均変位 \overline{X} を初期値として与え、時間間隔 ΔT は10分間、継続時間は $t=130$ 分までとした。尚、積分計算中 x'_y は \overline{X} の変化に伴い順次変化させている。太線は予測値、細線は10波の模擬風力による時刻歴応答解析結果の10分間毎の平均値の推移を表している。予測値1は、(4.4)式の積分区間中を x'_y から ∞ へと順に抽出し総和した値、予測値2は ∞ から x'_y へと順に抽出し総和した値、予測値3は任意に抽出し総和した値である。又、網掛部分は各10分間毎の10波の時刻歴応答解析結果から求めた平均値の95%信頼区間である。予測値3は予測値1と予測値2のほぼ中央値を示し、予測値1~3は平均変位の推移を良く表している。

これらの結果より、弾塑性構造物の風方向風力による平均変位の推移は、本予測手法によって予測可能であることが明らかとなった。

5. ゼロクロスピーク値を用いた変動成分の計算

風方向風力に対する弾塑性応答は風外力の低振動数成分の影響を強く受けており、風直角方向風力を対象として狭帯域な振動を扱った弾塑性応答予測手法¹⁾を直接適用することは困難である。3.において β が大きい場合の変動変位は弾性応答で近似できることが示されている。そこで、ここでは β が小さい場合について、弾塑性応答変位を固有振動数成分と低振動数成分とに分離し、各成分の応答値(レベルクロッシング数、変位の標準偏差、ゼロクロスピーク値分布)を用いて、入力エネルギーと最大変動変位の推定を行う。

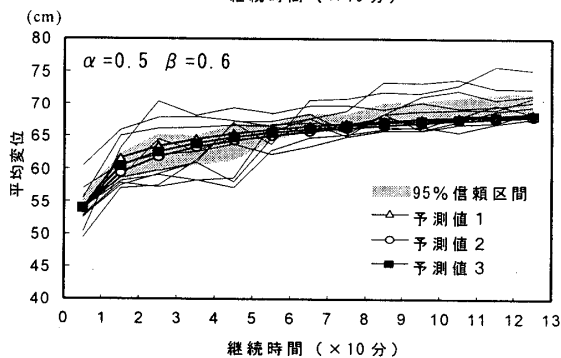
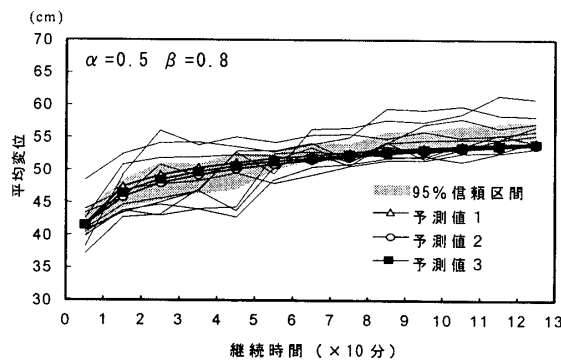


図-14 平均変位の推移

(1) 応答成分の分離

風方向風力による構造物の応答変位 $X(t)$ は平均変位 \bar{X} と変動変位 $x(t)$ に分けられる。弾性応答時の変動変位は広帯域定常確率過程の低振動数成分 (添字L) と、狭帯域定常確率過程の固有振動数成分 (添字N) の和であると考えられる。

$$X(t) = \bar{X} + x(t) \quad (5.1)$$

$$x(t) = x_L(t) + x_N(t) \quad (5.2)$$

弾塑性構造物の時刻歴応答 $x(t)$ をフーリエ変換により $n_{Bound} = n_e/2$ を境に固有振動数成分と低振動数成分とに分離し、2つの時刻歴応答 $x_N(t)$ と $x_L(t)$ を作成する。時刻歴応答変位波形の例を図-3(a)に示す。図-15 に β と各成分の変位の標準偏差の関係並びに β とレベルクロッシング数の関係の例 (wind5, $\alpha=0.5$) を示す。図中に6. で述べる予測値を折れ線で示す。変位の標準偏差は β の減少に伴い固有振動数成分が減少し、低振動数成分が増大する。レベルクロッシング数は β の減少に伴い両成分共に減少している。

両成分のゼロクロスピーク値 ($x_{p,L}, x_{p,N}$) 分布の例を図-16に示す。図中の一点鎖線は、分離された時刻歴応答波形から求めた応答変位の標準偏差 σ_L, σ_N を用い、固有振動数成分にはレーリー分布 ((3.1)式)、低振動数成分には(5.4)式に示す広帯域性を考慮した極値分布³⁾の正の領域に着目し、これを規準化した分布式 ((5.3)式) による確率密度を示したものである。また、6. で述べる予測値を実線で示す。

$$p_L(x_{p,L}) = \frac{f(x_{p,L})}{\int_0^x f(x_{p,L}) dx_{p,L}} \quad (5.3)$$

$$f(x_{p,L}) = \frac{\varepsilon}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_L} \exp\left(-\frac{x_{p,L}^2}{2\varepsilon^2 \cdot \sigma_L^2}\right) + \frac{x_{p,L} \sqrt{1-\varepsilon^2}}{2\sigma_L^2} \exp\left(-\frac{x_{p,L}^2}{2\sigma_L^2}\right) \times \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{1-\varepsilon^2}}{2} \cdot \frac{x_{p,L}}{\varepsilon \cdot \sigma_L}\right)\right] \quad (5.4)$$

但し、 $\operatorname{erf}(y) = \int_0^y \exp(-u^2) du$

$$\varepsilon^2 = 1 - \sigma_x^4 / (\sigma_x^2 \cdot \sigma_x^2)$$

ε は弾性系とした場合の値を用いた。

(2) 消費エネルギーの計算

履歴減衰による吸収エネルギーを、固有振動数成分の降伏変位以上のゼロクロスピーク $x_{p,N}$ によって消費されるエネルギー $E_{p,N}$ と、(5.5)式に示す低振動数成分のゼロクロスピークと固有振動数成分の降伏変位以下のゼロクロスピークとの和 $x_{p,NL}$ により消費されるエネルギー量 $E_{p,L}$ との合計として評価する。このとき、1)ピーク値は骨格曲線上にある、2)履歴ループは平均風力の釣合い点に対して対称である、と仮定する。評価時間 T 秒間の履歴吸収エネルギーは(5.6)式とする。

$$x_{p,NL} = x_{p,N} + x_{p,L} \quad \text{但し、} x_{p,N} < x_y \quad (5.5)$$

$$E_p = E_{p,N} + E_{p,L} = 4(1-\alpha)Q_y \cdot T \cdot \left\{ \nu_N \overline{(x_{p,N} - x_y)} + \nu_L \overline{(x_{p,NL} - x_y)} \right\} \quad (5.6)$$

但し、 ν_N, ν_L は各成分のレベルクロッシング数、 $\overline{\quad}$ は期待値を表す。

粘性減衰による吸収エネルギーは、固有振動数成分の

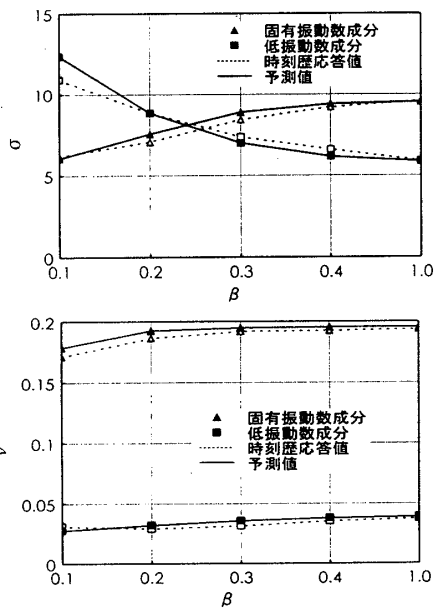
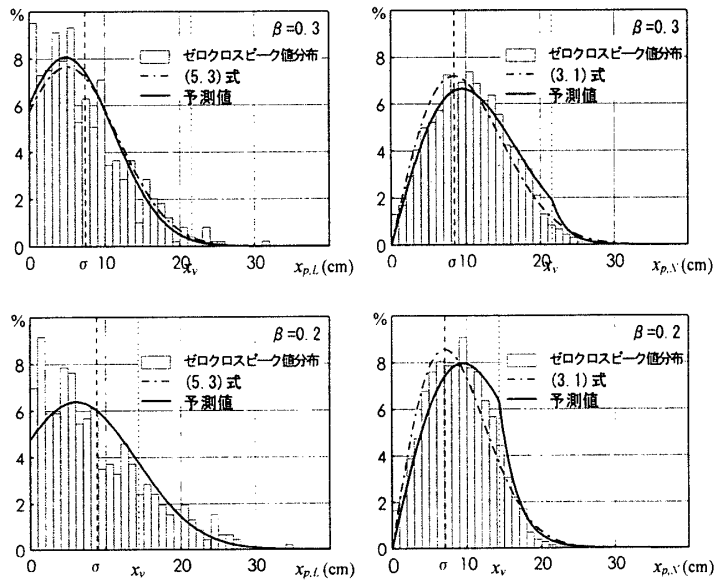


図-15 変位の標準偏差とレベルクロッシング数 ($\alpha=0.5$)



低振動数成分 固有振動数成分
図-16 ゼロクロスピーク値分布 (wind 5, $\alpha=0.5$)

応答 $x_N(t)$ と低振動数成分の応答 $x_L(t)$ との間に相関性が無いと仮定して各々の応答より評価する。評価時間 T 秒間の粘性減衰吸収エネルギーは(5.7)式とする。

$$E_h = 4\pi k_e h_e \frac{1}{n_e} (v_N^2 \sigma_N^2 + v_L^2 \sigma_L^2) T \quad (5.7)$$

$$\text{但し、} \sigma_N^2 = \frac{1}{2} x_{p,N}^2, \quad \sigma_L^2 = \frac{1}{2} x_{p,L}^2$$

wind5、 $\alpha=0.5$ 、 $\beta=0.1\sim 0.4$ について、(1) で求められたゼロクロスピーク値分布並びに確率密度関数を用いて計算されたエネルギー量を時刻歴応答解析結果と共に図-17 に示す。ゼロクロスピーク値分布を用いた計算値は良い精度で時刻歴応答解析結果と合致している。また、確率密度関数を用いた計算値も、概ね良い近似となるが、履歴吸収エネルギーがやや大きめの評価となっている。これは、固有振動数成分のゼロクロスピーク値分布にレーリー分布を適用すると、降伏変形 x_y 以上の超過確率が大きめに評価されるためと考えられる。

(3) 最大変動変位の計算

弾塑性応答全体のゼロクロスピークを、固有振動数成分のゼロクロスピーク $x_{p,N}$ と低振動数成分の変位振幅 x_L の和 $x_p (=x_{p,N}+x_L)$ で近似し、 $x_{p,N}$ と x_L が独立であると仮定し、そのゼロクロスピーク値分布を $x_{p,N}$ と x_L の確率密度関数を用いて(5.8)式で求める。ここで、低振動数成分の変位振幅 x_L の確率密度関数はガウス分布(5.9)式とする。

$$p_{x_p}(x_p) = \int_0^{\infty} p_{x_{p,N}}(x_{p,N}) \cdot p_{x_L}(x_p - x_{p,N}) dx_{p,N} \quad (5.8)$$

$$p_{x_L}(x_L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_L} \exp\left(-\frac{x_L^2}{2\sigma_L^2}\right) \quad (5.9)$$

これから、評価時間 10 分間の最大変動変位の期待値は、(5.10)式により与えられる³⁾。

$$\bar{x}_{\max} = \int_0^{\infty} x \cdot P_{\max}(x) dx \quad (5.10)$$

$$\text{但し、} P_{\max}(x) = N[1 - q(x)]^{N-1} P_{x_p}(x)$$

$$q(x) = \int_x^{\infty} p_{x_p}(\xi) d\xi, \quad N = 600v_N$$

図-18 に、(5.8)式により求められたゼロクロスピーク値分布の例 (wind5、 $\alpha=0.5$ 、 $\beta=0.3$) を時刻歴応答解

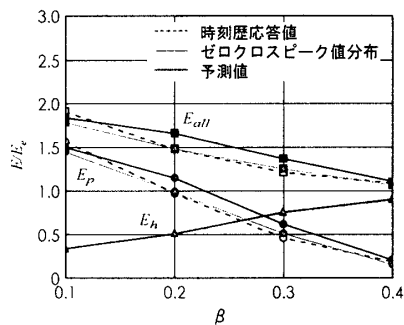


図-17 10 分間の消費エネルギー比

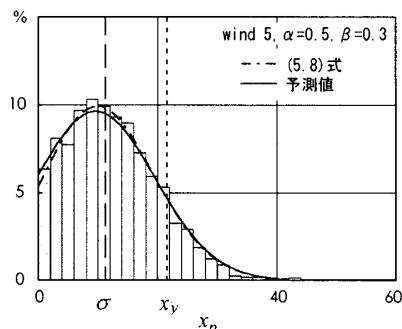


図-18 ゼロクロスピーク値分布

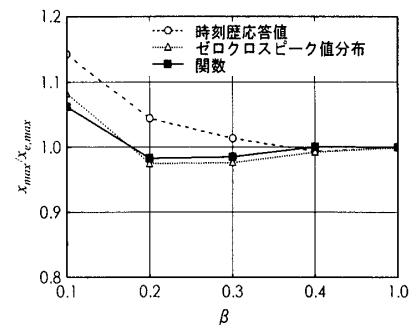


図-19 最大変動変位比

析の結果 (wind5、13 パートのアンサンブル平均) と共に示す。また、6. で述べる予測値も共に示す。

図-19 に、上述の計算により求められた最大変動変位の弾性時に対する比を、時刻歴応答解析の結果 (10 波 13 パートのアンサンブル平均) と共に示す。図中、“ピーク値分布” は時刻歴応答解析から得られる $x_{p,N}$ と x_L の度数分布を用いて、また、“関数” は $x_{p,N}$ と x_L に仮定した確率密度関数を用いてそれぞれ(5.8),(5.10)式により求めた値を示す。計算値はやや小さめの評価となるが、これは $x_{p,N}$ と x_L が独立であると仮定しているためであり、全体的な傾向は良く表している。

これらの結果より、消費エネルギーや最大変動変位は、固有振動数成分と低振動数成分に分離した応答波形の各成分の標準偏差、レベルクロッシング数、ゼロクロスピーク値分布を用いて、予測可能であることが確かめられた。

6. 変動成分の予測手法とその適用性の検討

6.1 変動成分の応答予測手法

弾性応答時の変動変位 $x_e(t)$ は、変動風力 $F(t)$ を低振動数成分の外力 $F_L(t)$ と固有振動数成分の外力 $F_N(t)$ に分離し、 $F_L(t)$ による応答変位 $x_{e,L}(t)$ と $F_N(t)$ による応答変位 $x_{e,N}(t)$ の和と見なすことができる。この時、低振動数成分の変位応答倍率がほぼ 1 であることから $x_{e,L}(t)$ は外力 $F_L(t)$ による準静的な振動となり、 $x_{e,N}(t)$ は固有振動数付近の振動が卓越した狭帯域な振動となる。

弾塑性応答における塑性化は両成分の和により生じるため、一般には弾塑性応答を弾性応答時のように各成分の外力による応答に分離することは困難である。ここでは、以下の 2 つの仮定を導入することによって弾塑性応答を両成分の和で表し、応答予測を行う。

1. 弾性応答時と同様に $F_L(t)$ による応答は準静的であり、 $F_N(t)$ による応答は共振的で狭帯域な振動である。
2. 低周波数成分のレベルクロッシング数 v_L と固有振動数成分のレベルクロッシング数 v_N との隔たりは十分大きい。

まず、低振動数成分の外力 $F_L(t)$ のみによる応答 $x'_L(t)$ と固有振動数成分の外力 $F_N(t)$ のみによる応答 $x'_N(t)$ を求める。仮定 1. より、 $x'_L(t)$ のゼロクロスピーク値分布は $F_L(t)$ の各ゼロクロスピーク $F_{p,L}$ が骨格曲線上で釣り合う点より求め、 $x'_N(t)$ のゼロクロスピーク値分布は風直角方向振動の弾塑性応答予測と同様の手法¹⁾により求める。

つぎに、外力 $F_L(t)$ と $F_N(t)$ の同時性を考慮した場合の応答 $x_L(t)$ 並びに $x_N(t)$ を $x'_L(t)$ 、 $x'_N(t)$ より予測する。

すなわち、まず、仮定 2. より、固有振動数成分が 1 サイクル経過する時間内 ($t_0 \leq t < t_0 + 1/v_N$) における低振動数成分外力 $F_L(t)$ の変動は小さいと見なし、固有振動数成分の応答 $x_N(t)$ を外力 $F_N(t)$ のみによる応答 $x'_N(t)$ に平均風力 $F_L(t_0)$ の影響を考慮した応答と考える。

$$F(t) = F_L(t_0) + F_N(t) \quad (6.1)$$

但し、 $t_0 \leq t < t_0 + 1/v_N$

$x'_N(t)$ は、正側と負側への降伏変位が等しい場合の応答であり、平均風力 $F_L(t_0)$ は正側と負側への降伏変位の不均等を生じさせる。 $F_L(t_0)$ 、 $F_N(t)$ 、 $x'_N(t)$ は、3. で示した応答性状 (図-3(a), (b)、図-12) における平均風力、変動風力、変動変位に対応し、したがって $x_N(t)$ は以下ようになる。 $x'_N(t)$ のゼロクロスピークが降伏変位 x_y 以下の時には、 $x_N(t)$ は β が大きい時の弾塑性応答と同様に履歴ループを描かず、弾性応答時とほぼ等しい変動変位となり、 $F_L(t_0)$ の値に応じて平均値の移動が生じるのみである。他方、 $x'_N(t)$ のゼロクロスピークが降伏変位 x_y 以上でその振幅が複数回繰り返される時には、 $x_N(t)$ は平均値が正側と負側への降伏変位が等しい平均風力と原点からの第 2 分枝勾配との釣り合い点へ移動し、釣り合い点周りに $x'_N(t)$ と同様の変動変位となる履歴ループを描く。したがって、これらの平均値の移動量を $x'_L(t)$ に算入することとし、平均値の移動に伴うエネルギー吸収による応答低減効果を見れば、 $x_N(t)$ のゼロクロスピーク値分布は $x'_N(t)$ のゼロクロスピーク値分布に一致する。

つぎに、低振動数成分の応答 $x_L(t)$ は、低振動数成分の外力 $F_L(t)$ のみによる準静的な応答 $x'_L(t)$ に上記移動量を加算した応答と考える。また、低振動数成分が 1 サイクル経過する時間内に固有振動数成分の片側のピークは平均 v_N/v_L 回生じるとする。ある低振動数成分外力の値がゼロクロスピーク値 $F_{p,L}$ の時の固有振動数成分 1 サイクルによる移動量の期待値を $\delta_1(F_{p,L})$ とすると、 $x_L(t)$ の各ゼロクロスピーク $x_{p,L}(F_{p,L})$ は $x'_L(t)$ の各ゼロクロスピーク $x'_{p,L}(F_{p,L})$ に、 $\delta_1(F_{p,L})$ と移動回数の期待値 ($v_N/4v_L$) の積を加算した値となる。ここで、移動量は平均風力の釣り合い点に対して対称であるとし、低振動数成分 1/4 サイクル中の $F_L(t)$ は、移動量の過大評価となるがゼロクロスピーク値 $F_{p,L}$ とした。

両成分のゼロクロスピーク値分布を用いて、5. と同様の手法により消費エネルギーと最大応答変位を求める。以下に計算手順の詳細を示す。

Step1. 風外力の分離

変動風力のパワースペクトル密度 $S_p(n)$ を、低振動数成分 $[0, n_{Bound}]$ と固有振動数成分 $[n_{Bound}, \infty]$ に分ける。但し、 $n_{Bound} = \frac{1}{2} n_e$ (n_e は固有振動数) とする。

Step2. 弾性応答量の計算

分離された風外力のパワースペクトルから確率統計的手法により、低振動数成分と固有振動数成分の弾性応答量 (応答変位の標準偏差 $\sigma_{e,L}$ 、 $\sigma_{e,N}$ 、レベルクロッシング数 $v_{e,L}$ 、 $v_{e,N}$ 、ゼロクロスピーク値分布 $p_{e,L}(x_{p,L})$) をそれぞれ求める。低振動数成分のゼロクロスピーク値分布 $p_{e,L}(x_{p,L})$ は広帯域性を考慮した(5.3),(5.4)式の確率密度関数とし、低振動数成分風外力 $F_L(t)$ のゼロクロスピークの確率密度関数 $p_{FL}(F_{p,L})$ を、 $p_{e,L}(x_{p,L})$ を用いて(6.2)式より求める。

$$p_{FL}(F_{p,L}) = \frac{1}{k_e} \cdot p_{e,L}\left(\frac{F_{p,L}}{k_e}\right) \quad (6.2)$$

Step3. 固有振動数成分の弾塑性ゼロクロスピーク値分布の算定

固有振動数成分のパワースペクトルと降伏変位 x_y を用い、風直角方向の弾塑性応答予測手法¹⁾によりゼロクロスピークの確率密度関数 $p_N(x_{p,N})$ を求める。同時に、応答変位の標準偏差 σ_N 、レベルクロッシング数 v_N 、履歴吸収エネルギー $E_{p,N}$ 、粘性吸収エネルギー $E_{h,N}$ を計算する。

Step4. 低振動数成分の弾塑性ゼロクロスピーク値分布の算定 (図-20 参照)

① 風外力の低振動数成分の各ゼロクロスピーク $F_{p,L}$ 毎に、固有振動数成分のゼロクロスピーク $x_{p,N}$ 1 回によって生じる移動量の期待値 $\delta_1(F_{p,L})$ を(6.3)式により求める。各 $x_{p,N}$ 1 回によって生じる移動量 $\delta_1(F_{p,L}, x_{p,N})$ は、 $F_{p,L}$ を平均外力として固有振動数成分の変動変位を 4. と同様

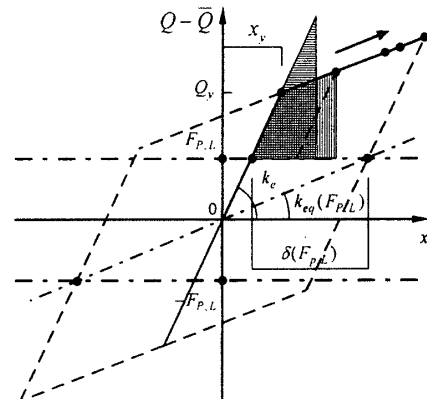


図-20 低振動数成分の等価剛性

にエネルギー一定則に従って骨格曲線上の変位に置換して求める。

$$\delta_1(F_{p,L}) = \int_0^\infty \delta_1(F_{p,L}, x_{p,N}) \cdot p_N(x_{p,N}) dx_{p,N} \quad (6.3)$$

② 低振動数成分のゼロクロスピーク $x_{p,L}$ を、 $F_{p,L}$ による準静的な変位と低振動数成分 1/4 周期に生じる移動量の期待値 $\delta(F_{p,L})$ の和と考え(6.4)式により算定し、 $F_{p,L}$ における等価剛性 $k_{eq,L}(F_{p,L})$ を(6.5)式により求める。

$$x_{p,L}(F_{p,L}) = x'_{p,L}(F_{p,L}) + \frac{v_N}{4v_L} \cdot \delta_1(F_{p,L}) \quad (6.4)$$

但し、 $x'_{p,L}(F_{p,L})$ は $F_{p,L}$ の骨格曲線上での釣り合い点を表し、 v_N, v_L は弾性時の値を用いる。

$$k_{eq,L}(F_{p,L}) = F_{p,L} / x_{p,L}(F_{p,L}) \quad (6.5)$$

③ Step2.により求められた $p_{FL}(F_{p,L})$ を用い、歪みエネルギー等置による等価剛性の期待値 $k_{eq,L}$ を(6.6)式により算定する。

$$k_{eq,L} = \frac{\int_0^\infty k_{eq,L}(F_{p,L}) \cdot x_{p,L}^2(F_{p,L}) \cdot p_{FL}(F_{p,L}) dF_{p,L}}{\int_0^\infty x_{p,L}^2(F_{p,L}) \cdot p_{FL}(F_{p,L}) dF_{p,L}} \quad (6.6)$$

④ 低振動数成分のパワースペクトル密度と $k_{eq,L}$ を用い、確率統計的手法により変動変位の標準偏差 σ_L を求める。但し、変位応答倍率がほぼ 1 の振動数範囲であることから、減衰定数は弾性時の構造減衰 h_e を用いる。

⑤ ゼロクロスピークの確率密度関数 $p_L(x_{p,L})$ を(5.3), (5.4)式によって、粘性吸収エネルギー $E_{h,L}$ を(5.7)式の第二項によって算定する。但し、レベルクロッシング数 v_L は風直角方向振動の弾塑性応答予測手法¹⁾と同様に(6.7)式による。

$$v_L = \frac{n_{eq,L}}{n_{e,L}} \cdot v_{e,L} \quad (6.7)$$

但し、 $n_{e,L}$ は弾性時の固有振動数、 $n_{eq,L}$ は等価線系の固有振動数を示す。

Step5. 消費エネルギーと最大変動変位の算定

粘性吸収エネルギーは Step3., Step4.にて算定されているので、履歴吸収エネルギーを 5. と同様に両成分の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(5.6)式により求める。

最大応答変位は、5. と同様に $x_{p,N}$ と x_L の確率密度関数を用いて(5.8),(5.10)式より求める。

6.2. 時刻歴応答解析との比較

応答変位の標準偏差：図-15 に予測値を時刻歴応答解析結果と共に示す。予測値は時刻歴応答解析結果に比べ固有振動数成分ではやや大きめの値を、低振動数成分ではやや小さめの値を示すが、 $\beta \geq 0.2$ の範囲での誤差は最大で7%以下であり、 β との全体的な傾向を良く表している。

ゼロクロスピーク値分布：図-16 に各振動数成分のゼロクロスピーク値分布の例を、図-18 に(5.8)式に従って求めた全体のゼロクロスピーク値分布の例を示す。固有振動数成分の降伏変位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良く近似している。

入力エネルギー： $\alpha=0.5$ の場合の入力エネルギーとその分担を図-21 に、 $\alpha=0.3, 0.5, 0.7$ の場合の入力エネルギーを図-22 に示す。 $\beta \geq 0.2$ の範囲で予測値は、粘性吸収エネルギー、履歴吸収エネルギー共に時刻歴応答解析結果より大きめの値を示している。これは固有振動数成分の標準偏差、レベルクロッシング数、降伏変位付近でのゼロクロスピーク値分布などの各予測値が時刻歴応答解析結果に比べ大きいためと考えられる。入力エネルギーの予測値は、 $\alpha=0.3, 0.5, 0.7$ でそれぞれ時刻歴応答解析結果の最大 1.42, 1.25, 1.12 倍となっている。

最大変動変位： $\alpha=0.3, 0.5, 0.7$ の場合を図-23 に示す。 $\beta \geq 0.2$ の範囲で予測値は時刻歴応答解析結果に比べやや小さめの値 ($\alpha=0.3, 0.5, 0.7$ でそれぞれ時刻歴応答解析結果の最小 0.92, 0.95, 0.97 倍) を示すが、全体的な傾向を良く表しており、5. での確率密度関数を用いた応答値からの計算結果とほぼ等しい値が得られた。

これら予測値と時刻歴応答解析結果との比較により、最大変動変位が 1 割程度小さめの値を示す場合があることに留意を要するが、 $\beta \geq 0.2$ の範囲で変動成分の応答予測が可能であることが明らかとなった。

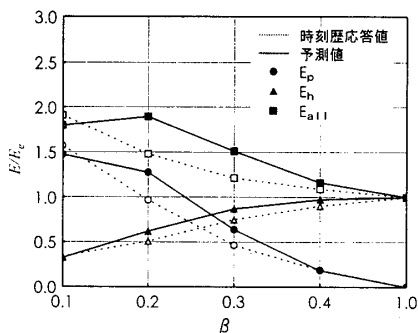


図-21 入力エネルギー比 ($\alpha=0.5$)

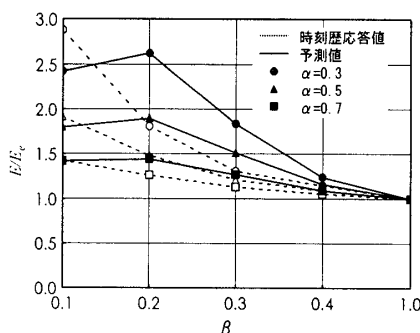


図-22 入力エネルギー比 ($\alpha=0.3, 0.5, 0.7$)

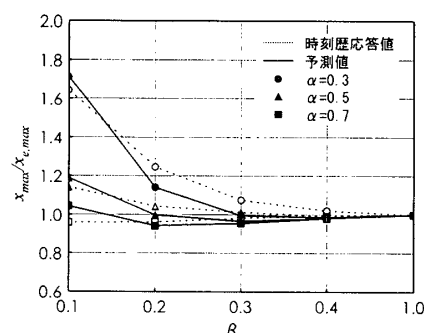


図-23 最大変動変位比

7. 結び

平均風力を有しかつ変動風力が広い範囲でパワーを有する風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。得られた知見を要約すると次の通りである。

1. 降伏点比により応答性状は2つのグループに分かれる。両者の分岐点は、降伏変位が弾性時最大変動変位と等しくなる降伏点比に対応する。
2. 降伏点比が大きい場合は、平均変位は時間の経過と共に移動するが変動変位は弾性時とほとんど同じ性状を示し、降伏点比が小さい場合は、平均変位は移動せず変動変位や入力エネルギーに弾塑性応答の影響がみられる。
3. 降伏点比が大きい場合の平均変位の推移は、レーリー分布と仮定した弾性応答時のゼロクロスピーク値分布を用いて予測可能である。
4. 降伏点比が小さい場合の消費エネルギーや最大変動変位は、固有振動数成分と低振動数成分に分離した応答波形のゼロクロスピーク値分布などを用いて推定可能である。
5. 降伏点比が小さい場合の消費エネルギー、変動変位、変動振幅の分布は、風直角方向の弾塑性応答予測手法¹⁾と上記4.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。

本研究では、前報と本報により、代表的な風力である風直角方向風力と風方向風力を対象とした弾塑性構造物の風応答性状ならびに応答予測手法を示した。

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風向や平均風速の変化、ねじれの影響、高次モード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。

謝辞

本研究にあたり、大成建設(株)技術研究所の浅見豊氏、構造設計部の丹羽秀聡氏にご協力戴くと共に貴重な御意見を戴きましたことを感謝します。

参考文献

- 1) 辻田 修 早部安弘 大熊武司 和田 章: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、日本建築学会構造系論文報告集第481号、1996.3
- 2) 日本建築学会:建築物荷重指針・同解説、1993
- 3) 岡内 功 伊藤 學 宮田利雄:耐風構造、丸善、1977
- 4) 辻田 修 大熊武司 早部安弘 丹羽秀聡 浅見 豊:弾塑性風応答の予測 平均値のある場合(その1~3)、日本建築学会大会学術講演梗概集、1995.8

(1995年12月5日原稿受理、1996年2月6日採用決定)