

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3 提案予測手法の風速変化に対する適用性

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

Part 3. Application to wind loads with variation of mean wind speed

辻田 修*, 丹羽秀聡**, 大熊武司***, 和田 章****

Osamu TSUJITA, Hidesato NIWA, Takeshi OHKUMA and Akira WADA

While stochastic methods to evaluate wind-induced response of elastic structures are well established, authors have previously proposed stochastic methods to predict wind-induced inelastic response. However, these stochastic methods for elastic and inelastic structures are based on a stationary random process with a fixed mean wind speed and do not consider the rapid variation of mean wind speed as shown in which a typhoon passes through a site.

In this paper, inelastic response under wind loads with variation of mean wind speed is predicted by applying methods previously proposed in Ref. [1] and [2]. It is confirmed that proposed methods are also valid for wind loads with variation of mean wind speed by comparison with results of time history response analysis.

keywords : Wind force, Changing mean wind speed, Inelastic response,
Mean displacement, Fluctuating displacement, Input energy

風外力、風速変化、弾塑性応答、平均変位、変動変位、入力エネルギー

1. 序

矩形平面を有する弾塑性構造物の風応答に関して、「その1 風直角方向振動の場合」¹⁾では、平均成分がほとんど無く変動風力の振動数範囲が比較的狭いという特徴を持つ風直角方向風力を対象に、「その2 風方向振動の場合」²⁾では、平均成分を有しかつ変動風力が低振動数成分を中心に広い範囲でパワーを有するという特徴を持つ風方向風力を対象に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、提示した弾塑性応答の確率統計的予測は、弾性応答の確率統計的予測手法^{3), 4), 5)}と同様に平均風速一定とした定常確率過程の基での予測であり、耐風安全性に大きな影響を与える台風通過時の様に風速変化の急激な風外力に対する応答への適用性は確かめられていない。

本報告では、風向は一定とするが平均風速が時間の経過とともに変化する場合の弾塑性応答予測を、「その1」¹⁾、「その2」²⁾に示した確率統計的手法を用いて平均変位、変位の標準偏差、最大変位、消費エネルギーに対して行い、予測値と時刻歴応答解析結果との比較より予測手法の適用性を検証する。なお、予測に用いる風外力情報は、平均風力係数、変動風力のパワースペクトル密度、および10分間毎の平均風速である。

2. 解析方法

まず、風応答は1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1方向の1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風力として与える。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0.20とする。

想定建物の諸元を表1に示す。建物規模は、幅 $B=50\text{m}$ 、奥行き $D=40\text{m}$ の矩形平面を有する高さ $H=200\text{m}$ 、地上部重量 $W=66000\text{ton}$ とする。弾性剛性時の固有周期は両方向共 5.0 秒、構造減衰は弾性剛性に対し減衰定数 2% の内部粘性型で、減衰係数は塑性化によって変化しないとする。

解析モデルの復元力特性は図1に示す Normal Bi-linear 型とし、第1第2分枝剛性比 α は 0.5 とする。降伏変位 x_p は表2に示す Case1 と Case2 の2種類を設定する。降伏変位を頂部での変形角(変位/建物高さ)に変換すると、Case1 で約 1/500、Case2 で約 1/1000 となる。また、時刻歴弾性応答解析結果の最大応答変位に対する降伏変位の比を β_0 として表2中に示す。

風外力は、壁面に正対する風向からの風方向および風直角方向風

* 大成建設株式会社設計本部構造設計部 次長

** 大成建設株式会社設計本部構造設計部 工修

*** 神奈川大学工学部建築学科 教授・工博

**** 東京工業大学建築物理研究センター 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., Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

力を想定し、平均風力ならびに変動風力のパワースペクトル密度は「建築物荷重指針・同解説」⁶⁾に示された値を用いる。図2に解析に用いた変動風力のパワースペクトル密度を示す。図中の横軸は、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 nB/U_H として示す。

頂部での平均風速の変化は、時間の経過と共に直線的に変化すると単純化し、最大の頂部平均風速 $U_{H,max}$ を 60.5m/s ($nB/U_H=0.165$)、平均風速が $U_{H,max}/2$ 以上となる風速の継続時間を 120 分とする。頂部での平均風速変化の種類として、図3に示す2種類 ($Type1, Type2$) を設定する。台風通過時の風速変化の様子は、通過経路や移動速度の影響により多様であると考えられるが、台風シミュレーションを行っているいくつかの研究^{6), 7), 8)}を参考にして平均風速の変化する勾配を設定している。なお、最大の頂部平均風速 $U_{H,max}=60.5\text{m/s}$ は建設地東京、地表面粗度区分Ⅲとして再現期間約 300 年に相当する。

応答解析に用いる時刻歴風力は、まず、風力係数の時刻歴を無次元時間刻み $\Delta t \cdot U_H/B=0.07$ で各風向毎に 10 波づつ発生させ、次に、図3に示す各時刻の平均風速より実時間間隔 0.2 秒となるモーダル風力へ各 $Type$ 毎に変換して作成する。図2に、平均風速が最大となる直前の 10 分間 ($Type1$ の場合 $230\sim 240$ 分、 $Type2$ の場合 $110\sim 120$ 分) におけるパワースペクトル密度を示す。横軸は最大平均風速で無次元化し、パワースペクトル密度は 10 波のアンサンブル平均としている。風直角方向の低振動数領域では、風速変化の影響により荷重指針の値に比べて大きなパワーを有しており、風速変化の急激な $Type2$ でより顕著である。

表1 建物諸元

頂部高さ H	200m	建物総重量 W	$66000t \cdot f$
幅 B	50m	構造減衰 h	2%
奥行き D	40m	1次固有振動数 n_c	0.2Hz

表2 解析パラメータ

風速変化	Type1		Type2	
	Case1	Case2	Case1	Case2
解析モデル	Case1	Case2	Case1	Case2
降伏変位 x_y (cm)	39.62	19.81	39.62	19.81
風方向 β_0	0.569	0.285	0.607	0.303
風直角方向 β_0	0.555	0.277	0.568	0.284

時刻歴応答解析は線形加速度法による直接積分とし、積分刻みは模擬風力データを直線補間で4分割した 0.05 秒とする。応答評価は 240 分間の応答解析より、 $U_H > U_{H,max}/2$ となる範囲 ($Type1$ の場合 $120\sim 240$ 分、 $Type2$ の場合 $60\sim 180$ 分) において各 10 分間毎 (以後、パートと呼ぶ) に 10 波のアンサンブル平均を求め、評価時間 10 分の各パートにおける応答値とする。ただし、「その1」¹⁾、「その2」²⁾と同じくこの解析においても振動依存風力 (空力弾性力、空力減衰力) は考慮しない。

3. 弾性応答

3.1 弾性応答予測

各パートの平均風速に対応する風力が 10 分間連続して作用していると考え、パート毎に文献 5), 9) に示されている確率統計的手法により弾性応答を予測する。予測手法の概要は以下の通りである。

各パートの平均変位 \bar{X}_i は、パート毎の平均風速より求められる平均風力 \bar{F}_i とモーダル剛性 k_e を用いて下式により求める。

$$\bar{X}_i = \bar{F}_i / k_e \quad (3.1)$$

各パートにおける変位の標準偏差 $\sigma_{x,i}$ と最大変動変位 $x_{max,i}$ は以下に示す2種類の予測法により求める。

予測法 A: 変動風力のパワースペクトル密度 $S_F(n)$ より変動変位のパワースペクトル密度 $S_x(n)$ を求め、(3.3)式より変位の標準偏差 σ_x を算定する。次に、ピーク値 x_p の確率密度 $p(x_p)$ をレーリー分布 (3.4)式) と仮定して評価時間 10 分間の最大変動変位 x_{max} の期待値をその超過確率より求める。 $S_F(n)$ は荷重指針に示されたパワースペクトル密度を用いる。

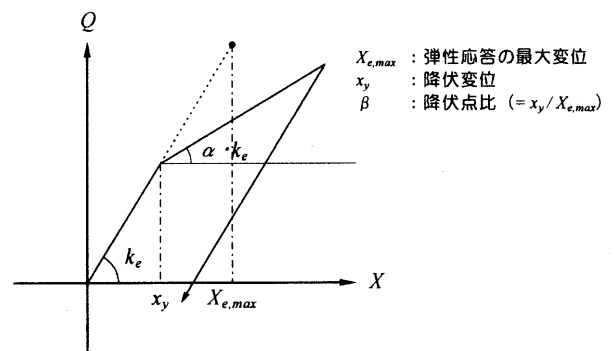


図1 復元力特性

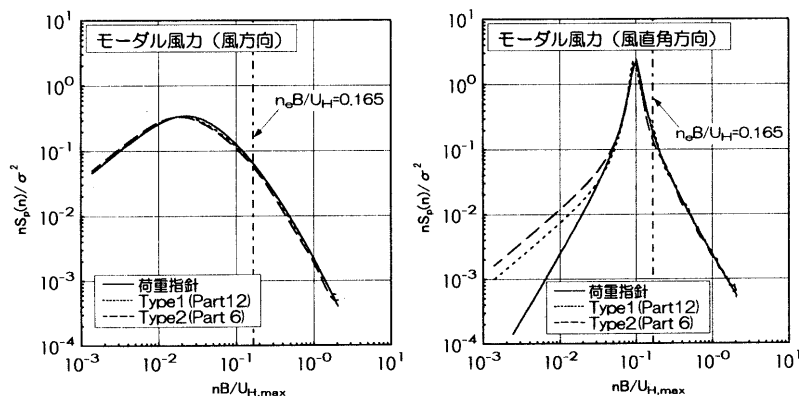


図2 風力のパワースペクトル密度

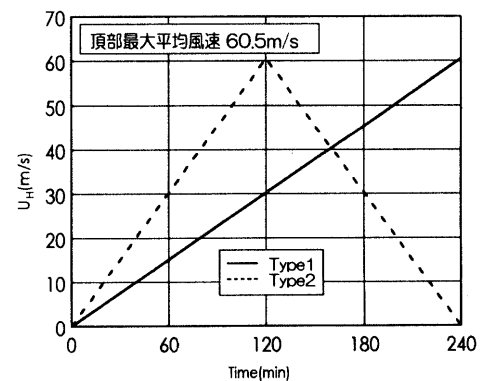


図3 平均風速の変化

$$S_x(n) = \int_0^\infty |\chi(n)|^2 \cdot S_F(n) dn \quad (3.2)$$

$$\sigma_x^2 = \int_0^\infty S_x(n) dn \quad (3.3)$$

$$p(x_p) = \frac{x_p}{\sigma_x^2} \exp\left\{-\frac{x_p^2}{2\sigma_x^2}\right\} \quad (3.4)$$

但し、 $|\chi(n)|^2$ は力学的アドミッタンスを示す。

予測法 B : 荷重指針⁵⁾ に示された手法による。予測法 A との主な違いとしては、変動変位のパワースペクトル密度を(3.2)式に依らず応答倍率を考慮した共振成分と準静的な応答とする非共振成分との和としている点、風直角方向振動時のレベルクロッシング数を固有振動数としている点が挙げられる。

3.2 時刻歴応答解析結果と予測値の比較

時刻歴応答解析より求められた各部分の平均変位、変位の標準偏差、最大変動変位を図4(風方向)および図5(風直角方向)に予測値とともに示す。

平均変位: 時刻歴応答解析結果と予測値は、風速変化の Type によらず良い一致を示している。

変位の標準偏差: 風方向振動では、予測法 A と B の差はほとんど無く、風速変化の急激な Type2 での予測値は高風速領域で時刻歴応答解析結果に比べ最大 9% 小さな値となっている。これは、パー

ト内でも平均風速は変化しており、平均風速の変化に伴うパート内での平均変位の移動を予測法では考慮していないためである。詳しくは 4. にて考察する。

風直角方向振動では、風速変化の Type に依らず予測法 B は予測法 A に比べ 2%~5% 程度小さな値を示す。これは、予測法 B では、共振成分算定時に風力のパワースペクトル密度として固有振動数での値を全周波数に対して用いており、固有振動数に比べ低振動数側で鋭いピークを示す部分(無次元振動数で 0.1 付近)のパワースペクトル密度を考慮していないことに起因していると考えられる。予測法 A と時刻歴応答解析結果は比較的良好な対応を示している。

最大変動変位: 風方向、風直角方向とも変位の標準偏差と同様の傾向を示すが、風直角方向での予測法 A と予測法 B の差は変位の標準偏差に比べて少なくなっている。これは、予測法 B ではピークファクタ g_f の算定時に、レベルクロッシング数 v を固有振動数 n_e に等しいと仮定して予測法 A に比べ多少大きめの値を採用しているためである。風方向振動 Type2 において時刻歴応答解析結果が最大風速となる時刻(120分)に対して対称となっていない。その原因として風速変化の影響が考えられるが、長周期成分が多く含まれる風外力に対する減衰の小さな構造物応答の最大値を求めるアンサンブルの母集団が 10 波と少ないことも影響していると思われる。

4. 弾塑性応答

4.1 弾塑性応答予測

弾塑性応答予測は、各部分の平均風速に対応する風力が 10 分間連続して作用していると考え、文献 1), 2) に示した手法を用いて行う。予測手法の概要は以下の通りである。

風直角方向振動: 弾塑性応答時におけるピーク値の確率密度関数 $p(x_p)$ を仮定し、 $p(x_p)$ より算定される 1 サイクル当たりの消費エネルギー(履歴減衰による消費エネルギーと粘性減衰による消費エネルギーの和)と等価線形系に予想される消費エネルギーが等しくなる点を求め、ピーク値の確率密度関数 $p(x_p)$ を確定する。求められたビ

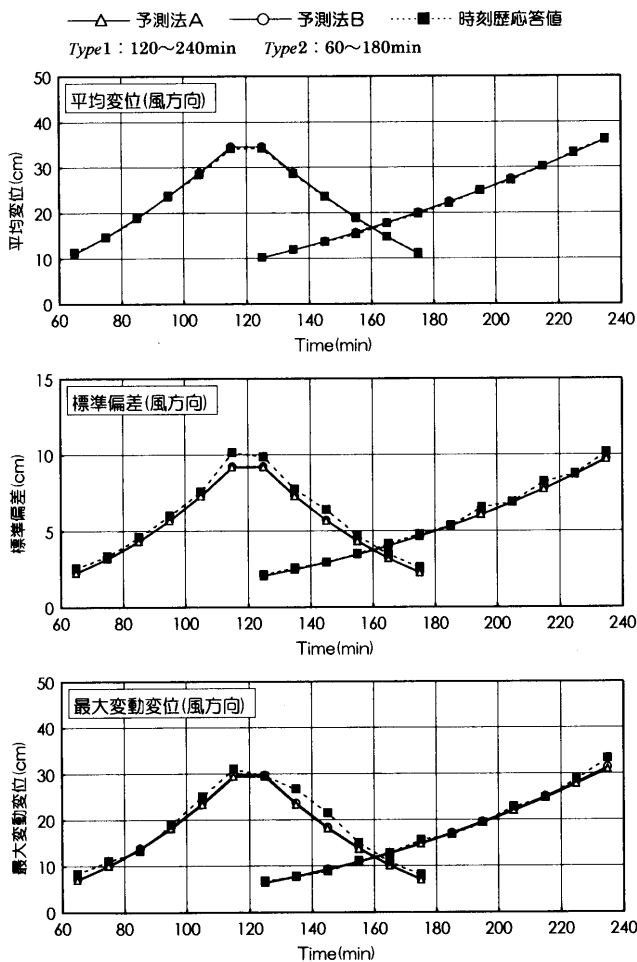


図4 弾性応答解析結果(風方向)

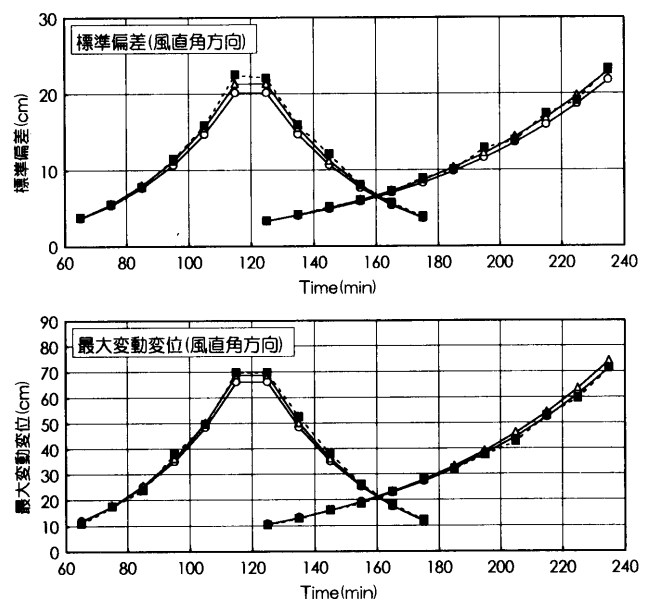


図5 弾性応答解析結果(風直角方向)

ーク値分布より弾塑性応答量の計算を行う。

風方向振動: 降伏変位 x_y の弾性時最大応答変位 $X_{e,max}$ に対する比 β によって算定方法が異なる。弾性時のガストファクタを G として、

$\beta > 1 - 1/G$ の場合: 最大変動変位が降伏変位以下の場合であり、片側でのみ塑性化が生じるため時間の経過と共に平均変位は増加するが、変動変位は弾性応答と同等とする。

$\beta \leq 1 - 1/G$ の場合: 平均変位は平均風力と原点からの第2分枝勾配との釣り合い点であるとし、変動変位は変動風力に含まれる低振動数成分の影響による振動の広帯域性を考慮したピーク値分布を基に弾塑性応答量を計算する。

平均変位の予測方法: $\beta > 1 - 1/G$ における平均変位の移動量は、変動変位のピーク値分布をレーリー分布と仮定し、各ピーク値に対応してエネルギー一定則から求まる移動量 (図6参照) と評価時間10分間における発現回数期待値との積を合計して求める。パート i での平均変位を \bar{X}_i 、移動量を δ_i とすると、パート $i+1$ での平均変位 \bar{X}_{i+1} は(4.1)式となる。

$$\bar{X}_{i+1} = \bar{X}_i + \delta_i + (\bar{F}_{i+1} - \bar{F}_i) / k_e \quad (4.1)$$

但し、平均風力は各パートでの平均風速を、移動量 δ_i はパート i での最終時刻における平均風速を用いて計算する。

4.2 時刻歴応答解析と予測値の比較

時刻歴応答解析より求められた各パートの平均変位、変位の標準偏差、最大変位を図7 (風方向) および図8 (風直角方向) に、各

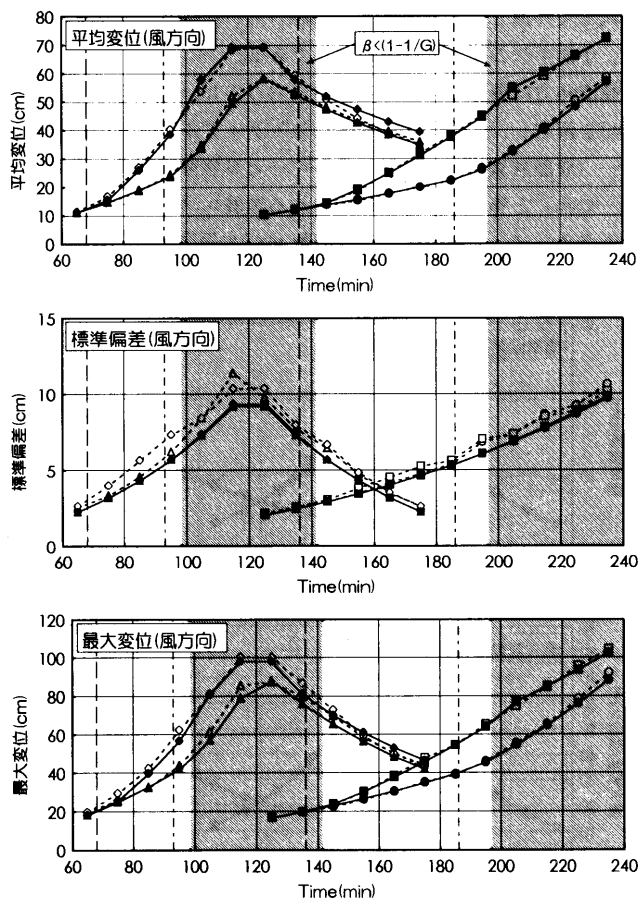


図7 弾塑性応答変位(風方向)

パートで消費される粘性吸収エネルギーおよび履歴吸収エネルギーを図9に、予測値とともに示す。図中の時間軸上に示した一点鎖線 (Case1) および破線 (Case2) は、評価時間10分での弾性時最大応答変位の予測値が降伏変位となる弾性限界風速 U_{He} の時刻を示している。また、風方向振動の斜線部は Case2 で $\beta \leq 1 - 1/G$ となる範囲を示している。

平均変位: $\beta > 1 - 1/G$ の範囲では塑性化が平均風力方向のみ生じるため、Type2における平均変位の変化は、塑性化が生じる風速増大時に大きく、風速減少時には弾性時とほぼ同等となる。その結果、残留変位を生じている。各 Type、各 Case とみ予測値は時刻歴応答解析結果と良い一致を示している。但し、Case2 で風速が増大して $\beta \leq 1 - 1/G$ の範囲 (図中での斜線部) へ入った初めの10分間の平均変位は、予測値がやや大きめの値を示す。これは、この10分間の平均変位の予測時に、平均風力と原点からの第2分枝勾配との釣り合い点へ即時に移動すると仮定しているためである。

変位の標準偏差: 風直角方向振動の予測値は、風速変化の大きな

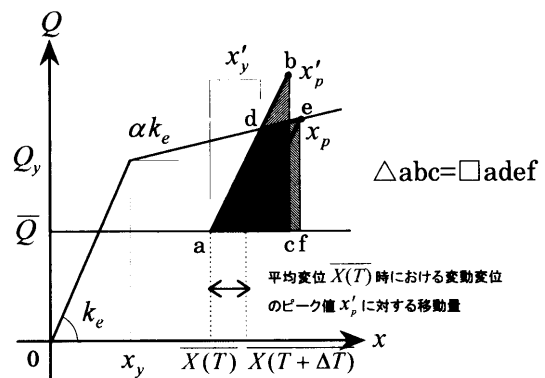


図6 エネルギー一定則

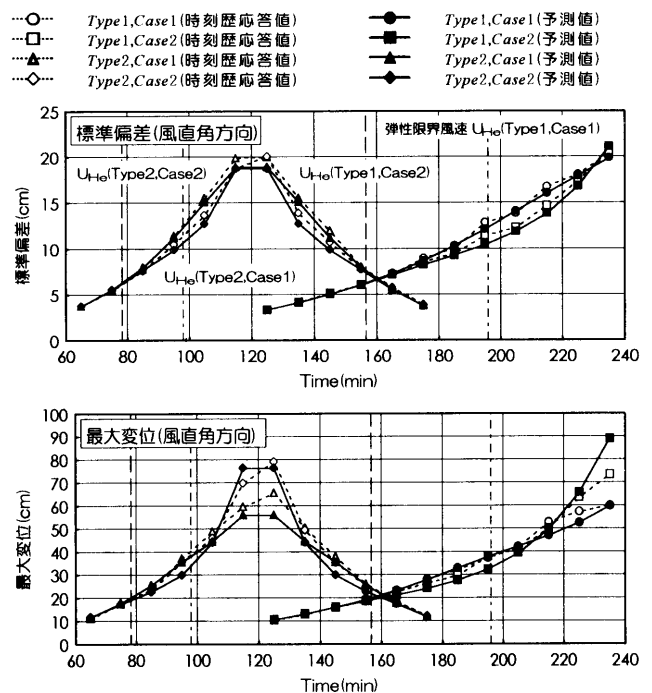


図8 弾塑性応答変位(風直角方向)

Type2の最大風速(120分)付近でやや小さめの値(5%程度)を示しているが、全般に時刻歴応答解析結果と良い対応を示している。

風方向振動の予測値は時刻歴応答解析結果に比べ小さめの値を示し、平均変位の推移が急激な時間領域でその差が大きくなっている。これは、図3に示した平均風速の変化がパート内でも生じていることを予測時に考慮していないことに起因している。

評価時間を短くしていった場合、平均風速によって生じる平均変位は、10分間内で連続的に変化する。そこで、平均変位がパート内

で直線的に変化すると仮定し、先に予測した変動変位(標準偏差 σ)がこの変化する平均変位上で振動した場合の標準偏差 σ' を求めると(4.2)式となる。

$$\sigma'^2 = \sigma^2 + \frac{a^2}{12} \quad (4.2)$$

但し、 a はパート内での平均変位の変化量を示し、前後のパートでの平均変位 \bar{X}_{i-1} と \bar{X}_{i+1} の差の1/2とする。

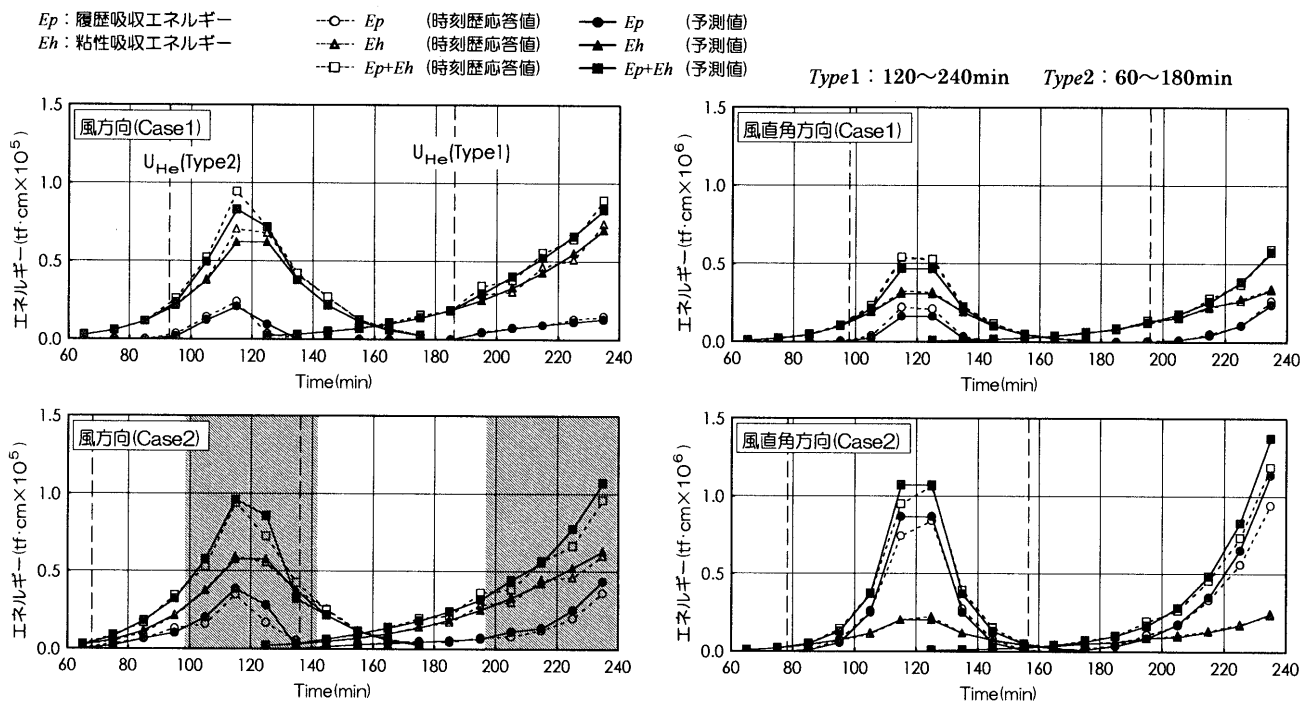


図9 各10分間の消費エネルギー

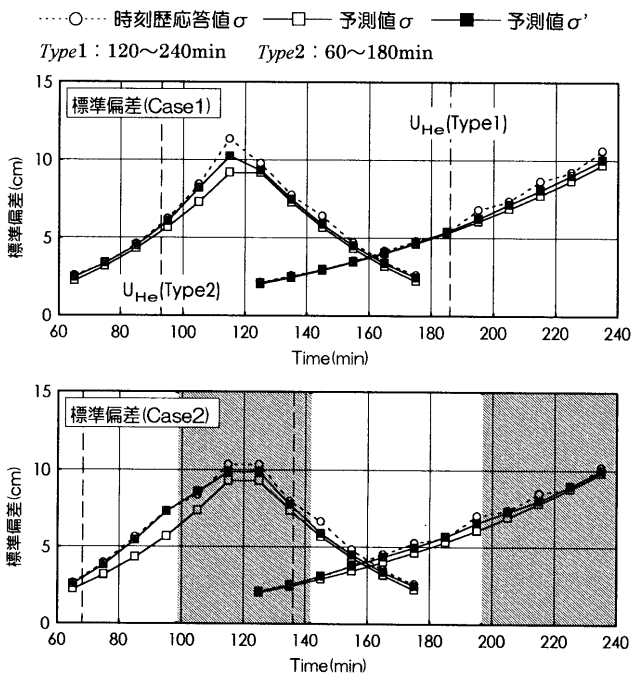


図10 平均変位の推移を考慮した標準偏差の予測

表3 累積エネルギー (Type1: 240min, Type2: 180min)

		単位 $\times 10^6$ (tf·cm)				
Type	Case		Ep	Eh	Ep+Eh	
風方向	Type1	Case1	予測値	0.45	2.85	3.30
		時刻歴	0.49	2.96	3.45	
		(予測/時刻歴)	(0.91)	(0.96)	(0.96)	
	Case2	予測値	1.18	2.75	3.92	
		時刻歴	1.02	2.70	3.72	
		(予測/時刻歴)	(1.15)	(1.02)	(1.05)	
風直角方向	Type1	Case1	予測値	3.98	13.48	17.45
		時刻歴	4.32	13.44	17.76	
		(予測/時刻歴)	(0.92)	(1.00)	(0.98)	
	Case2	予測値	24.48	9.45	33.93	
		時刻歴	21.73	9.30	31.03	
		(予測/時刻歴)	(1.13)	(1.02)	(1.09)	
風直角方向	Type2	Case1	予測値	3.70	13.39	17.09
		時刻歴	5.07	13.88	18.95	
		(予測/時刻歴)	(0.73)	(0.96)	(0.90)	
	Case2	予測値	23.61	9.34	32.94	
		時刻歴	22.93	9.45	32.38	
		(予測/時刻歴)	(1.03)	(0.99)	(1.02)	

(4.2)式によって求めた変位の標準偏差予測値 σ を図 10 に示す。平均変位の推移を考慮した予測値 σ と時刻歴応答解析結果は良い一致を示している。従って、図 7 での予測値 σ と時刻歴応答解析結果との不一致は、振動エネルギーや変動変位振幅の不一致を示すものではなく、パート内で生じる平均変位の推移による影響であることが分かる。

最大変位：風直角方向振動の予測値は、全般に時刻歴応答解析結果と良い対応を示している。風速変化の緩やかな *Type1* では *Case2* の最大風速付近 ($\beta = 0.277$) で時刻歴応答解析結果に比べやや大きめの予測となるのは、平均風速が一定の場合における $\beta < 0.3$ の予測¹⁾と同様の傾向である。風方向振動では、塑性化する時間領域で平均変位の最大変位に占める比率が高いことから、予測値と時刻歴応答解析結果とは変位の標準偏差に比べ良い対応を示している。

消費エネルギー：図 9 より、風直角方向振動は風方向振動に比べ履歴吸収エネルギー E_p で約 10 倍、粘性吸収エネルギー E_h で約 5 倍と大きな吸収エネルギーとなっていることが判る。また、予測値はエネルギー量、時間変化の様子共に時刻歴応答解析結果を良く表している。

表 3 に、 E_p 、 E_h 、 E_p+E_h それぞれの解析開始から終了までの合計の予測値を時刻歴応答解析結果と共に示す。予測値は、履歴吸収エネルギー E_p で概ね -10% から +15% の、粘性吸収エネルギー E_h で概ね $\pm 5\%$ の範囲内に収まっている。但し、風直角方向振動時における *Type2*、*Case1* の E_p は -27% とやや予測精度が悪くなっている。これは、予測では *Type1*、*Type2* 共に同程度の E_p となるのに対し、時刻歴応答解析結果では風速変化の急激な *Type2* で風速変化の緩やかな *Type1* に比べ大きな E_p を示しているためである。*Case2* の時刻歴応答解析結果にはこの様な傾向はみられず、*Case1* 特有の現象であり、主に塑性化の生じる時間の短いことに起因していると思われる。

5. 結び

平均風速が時間の経過と共に変化する場合の弾塑性応答を、各 10 分間平均風速と変動風力のパワースペクトル密度を用いた定常確率過程に基づく統計的手法により予測し、時刻歴応答解析結果との比較より予測手法の適用性を検証した。得られた知見を要約すると次の通りである。

1. 風方向振動時における平均変位の推移は、弾性時、弾塑性時ともに予測値と時刻歴応答解析結果は良く一致している。
2. 風方向振動時における変位の標準偏差は、平均変位の推移が急激な時間領域で時刻歴応答解析結果に比べ小さな予測値を示す。

しかし、これはパート内での平均変位の推移による影響であり、変動変位振幅は予測可能である。

3. 風方向振動時の最大変位、風直角方向振動時の最大変位、変位の標準偏差は、予測値と時刻歴応答解析結果が良く一致している。
4. 履歴吸収エネルギー E_p 、粘性吸収エネルギー E_h の予測値は、エネルギー量、時間変化の様子共に時刻歴応答解析結果を良く表しており、誤差は E_p で概ね -10% から +15% の、 E_h で概ね $\pm 5\%$ の範囲内に収まっている。

建物の構造特性や風速変化の形態など限られた条件下での検討ではあるが、平均風速一定とした定常確率過程の基での予測法を各 10 分間に適用することにより、台風通過時の様に平均風速が時間の経過と共に変化する場合の弾塑性応答が予測可能であることを示した。また、建物の使用年限中に想定される風応答による疲労累積損傷の評価を、時刻歴弾塑性応答解析によらず 10 分間平均風速とその累積作用時間を用いた確率統計的手法によって行える可能性が確かめられた。

謝辞

本研究を進めるにあたり、大成建設(株)技術研究所の浅見 豊氏、構造設計部の早部安弘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) 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 2 風方向振動の場合、日本建築学会構造系論文報告集第 485 号、1996. 7
- 3) A.G.Davenport : The Application of Statistical Concept to the Wind Loading of Structures, Proc. Ins. Civil Engrs. Vol.19, 1961
- 4) A.G.Davenport : Gust Loading Factors, Proc. ASCE, Vol.93, ST 3, June, 1967
- 5) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説、1993
- 6) 藤井 健、光田 寧：台風の確率モデルによる強風のシミュレーション、日本風工学会誌第 28 号、1986. 6
- 7) 近藤宏二、吉田正邦、堀越清視、津川恒久：風振動による鋼製部材の疲労損傷評価その 1 台風時の風向・風速の推定、日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)、1992. 8
- 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. 11
- 9) 岡内 功、伊藤 學、宮田利雄：耐風構造、丸善、1977

(1996年9月10日原稿受理、1996年11月26日採用決定)