

風を受ける洋上風力発電施設の耐震性及び防振対策に関する模型実験とその解析

MODEL TEST AND ITS ANALISES ON SEISMIC RESPONSE AND SEISMIC ISOLATION FOR AN OFFSHORE WIND TURBINE STRUCTURE

関田欣治¹・吉成岳彦²・山下篤³・林伸幸³・矢後清和⁴
Kinji SEKITA, Takehiko YOSHINARI,
Atsushi YAMASHITA, Nobuyuki HAYASHI and Kiyokazu YAGO

¹正会員 工博 東海大学 海洋学部 海洋土木工学科(〒424-8610 静岡県静岡市清水折戸3-20-1)

²東海大学 大学院 海洋学研究科海洋工学専攻

³正会員 新日本製鐵(株) 鉄構海洋事業部 建設・技術部(〒100-8071東京都千代田区大手町2-6-3)

⁴海上技術安全研究所 海洋開発研究領域(〒181-0004東京都三鷹市新川9-38-1)

Japan has lagged behind European countries in advancing wind turbine technologies in part due to the occurrence of frequent severe earthquakes. Therefore we conducted a 1/55 scale model test to clarify vibration characteristics of an offshore wind turbine structure during earthquake conditions (actual frequencies from 3 to 1 Hz), by using shaking table together with wind action. The test was also carried out in wind tunnel generating low frequency oscillations (0.27-0.67Hz) correspondent with the first natural period of the structure. Furthermore by fixing isolation rubbers onto the foundation of the model, we also examine the effect of seismic isolation in order to diminish vibrations caused by ground motion. The measured strains in tower and acceleration of a nacelle were compared with results of dynamic analyses by using finite element analysis. We concluded that while rubber isolators are valid for wide frequencies, the fluctuating wind forces acting on rotational blades also decrease the motion of tower as aerodynamic damper.

Key Words: Offshore wind turbine, seismic vibration and oscillation, seismic isolation, damping, dynamic analysis

1. はじめに

現在我々は、化石燃料による環境問題や資源の有限性など深刻な問題に直面している。また、石炭・石油による火力発電に依存しているため地球温暖化の原因である二酸化炭素を大量に排出しているのが現状である。そこで地球温暖化を抑制し且つ、再生可能で無尽蔵な新エネルギーである太陽光発電・風力発電・温度差エネルギーなどの石油代替エネルギーの導入が検討されている。風力発電は再生可能なクリーンエネルギーとして世界各地で開発されており、2002年末で世界の風力発電設備容量は約32,000MWに達した。

また、我が国は2010年までに300万kW実現という国家目標を立てているが、社会条件等の制約から陸上の適地が少なく現在までで40万kWというのが現状である。その結果、とりわけ洋上風力発電施設の建設に対する期待が大きい。今まで、我々は固定式風車模型に免震・制振装置を取り付け、風洞

中で振動低減に関する模型実験などの基礎的研究を実施し免震・制振対策の必要性を確認した。

さて一方で、我が国は地震の発生が頻繁であり風力発電施設を建設するにあたり、耐震性の検討は不可欠である。しかしながら、元々欧米で風力発電施設は発展してきたため、耐震性の検討例¹⁾は極めて少ない。そのため、今後我が国においては風力発電施設の耐震設計技術の確立が強く求められてくると思われる。

2. 研究目的

上述の通り、風力発電施設を建設する際耐震設計は今後我が国で風力発電の普及を増進していくためにも重要であり、昨年タワーに免震・制振装置を取り付けた風力発電施設模型の動的挙動低減に関する基礎的研究²⁾を実施した。そこで効果のあった免震装置に関して、それを模型と基間に取り付け、振動台上で地震波と風を同時に作用させ振動

性能が如何に変わるかを調べた。さらに動的数値解析を行い比較した。最初、タワー式風車模型の縮尺を1/55としブレード(NACA63₃-418)用いて³⁾実験を実施した。

実験は、(独)海上技術安全研究所の風洞装置に正弦波振動を起こせる起振装置を導入し風環境下における振動実験を実施した。当装置では地震波に相当する高振動数の加振ができなかったため、別途東海大学構造実験室の振動台を用いて大型扇風機により風を発生させながら、基盤には高周波数の加振を行った。本研究では以下のことを目的とした。

- (1) 風が作用するもしくは作用しない条件下における風力発電施設の規則波地震動に対する動的挙動の把握
- (2) 風や地震波による免震性能の確認
- (3) 風抗力係数の把握
- (4) 動的解析結果との比較により減衰定数の確認

3. 実験条件及び実験方法

(1) タワー式風車模型

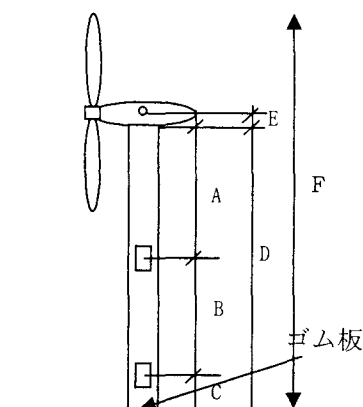


図-1 タワー式風車模型図

表-1 タワー諸言

パイプ直径(cm)	1.5
パイプ断面積(cm ²)	0.3905
断面2次I(cm ⁴)	0.0977
ヤング係数(Pa)	9.99×10 ¹⁰
区間A(cm)	48.3
区間B(cm)	30.4
区間C(cm)	14.8
区間D(cm)	93.5
区間E(cm)	4.0
全高F(cm)	157.0
ブレード半径(cm)	60
タワー部重量(g)	562
ナセル部重量(g)	503
総重量(g)	1065

(2) 海上技術安全研究所実験条件

海上技術研究所の風洞水槽における実験のうち、風だけ与える実験ではブレード回転・停止時の2条件、定常風・変動風の2種類、免振ゴムの有無の2種類、計8つの組合せで実施した(表-2, 3参照)。また、地震波を受ける場合の実験では、ブレード回転時の風速を0・1.6・3.0(m/s)の3種類を1ケースとし、地震波は入力加速度を241.8m/s²一定で周波数を2.0, 3.5, 5.0Hzの3種類、風種とゴムの有無で計12ケースとした。模型風速及び加振周波数を実機換算すると風速9~46m/s, 周波数14.8~37.1Hzとなる。加振振動数は地震波のものとかげ離れている。なお、免振ゴムは2×2×0.3cmのサイズのゴム板を使用した。

表-2 ブレード回転時

		風速(m/s)
ゴム無し	定常風	1.25, 1.73, 2.19, 2.60, 3.03, 3.45, 3.88, 4.31, 4.73
	変動風	2.12, 2.48, 2.79, 3.20, 3.54, 3.93, 4.31, 4.67, 5.03
ゴム有り	定常風	1.35, 1.77, 2.20, 2.62, 3.01, 3.43, 3.86, 4.30, 4.71
	変動風	2.17, 2.48, 2.79, 3.18, 3.53, 3.90, 4.26, 4.67, 5.02

表-3 ブレード停止時

		風速(m/s)
ゴム無し	定常風	3.48, 3.90, 6.87
	変動風	3.24, 3.63, 6.20
ゴム有り	定常風	3.49, 3.92, 6.86
	変動風	3.27, 3.66, 6.22

(3) 構造実験室実験条件

東海大学の振動台には風洞装置が無いため、業務用扇風機を用い変動風を発生させた。地震波の入力加速度を98・196cm/s²の2水準、周波数を4種類、免振装置の有無で2種類とし合計16ケースの実験を実施した。免振装置は海上技術安全研究所の実験で使用した平板ゴムを使用した。模型加振周期を実機換算すると0.3~1.0sとなる。また、風速は0, 20, 30m/sに相当する風速である(表-4参照)。

表-4 実験条件

地震周期Te(s)	1.0	0.8	0.5	0.3
模型地震周期Tm(s)	0.13	0.11	0.05	0.02
実機周波数Fe(Hz)	1.0	1.25	2.0	3.33
模型周波数Fm(Hz)	7.42	9.27	14.7	24.7
実機風速(m/s)	0	22.3	29.7	
模型風速(m/s)	0	3.0	4.0	
加速度(m/s ²)	0.98		1.96	

4. 解析

汎用の有限要素法プログラムMARCを用いて解析を行った。タワー部を6つの梁要素で表わし、ナセルを集中質量、タワーは連続質量でモデル化した。実験模型の計測点の位置及びその中間点に節点を設けた。

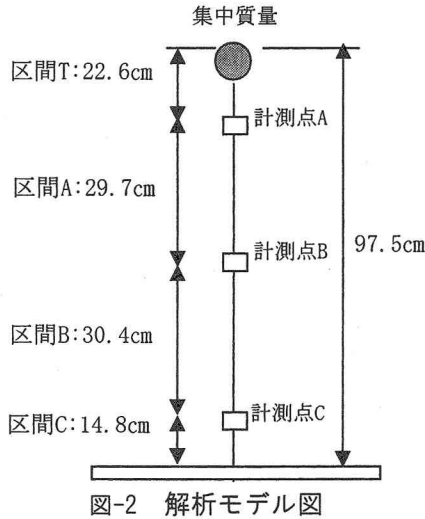


図-2 解析モデル図

(1) 固有値解析

計測用ケーブルや歪ゲージ等の質量も加え(真鍮パイプ単独のタワー部の分布質量を約1.7倍, ナセル単独の集中質量を1.1倍), 解析では梁要素の単位体積重量を 25.09g/cm^3 (245.9kN/m^3), 加速度計を加えたナセルの集中重量を 553.3g とした。その結果, MARCによる1次の固有周期は 0.311s となり, 実験で得られた1次固有周期にほぼ一致した。また, 片持梁の計算式⁴⁾でも約 0.310s と求められた。

実験では免震ゴムありモデルの固有周期は 0.325s (3.08Hz)となった。ゴムの特性は不明なため解析上では固有周期は 0.325s となるように免震ゴム無しモデルの下端要素の剛性を 0.83 倍と低減した。その結果, 2次固有周期は 0.037s (27.0Hz), 3次固有周期は 0.012s (83.3Hz)であり, 両者ともほとんど変わらなかった。

(2) 調和振動解析

入力地震波は加速度規則波とし, 加速度振幅は 98cm/s^2 (1gal)とする加振振動数 f_m は $1.0\sim 30\text{Hz}$ の範囲に, 増分刻み 0.1Hz 合計 200 ステップで計算を行った。免震ゴム無しモデルの場合は減衰定数を 3.3% とし, 免伸ゴム有りモデルの場合は減衰定数を 5.0% とした。

a) 絶対応答加速度

MARCの調和振動解析では, 加速度調和波 ($A_g = a_g \sin \omega t$) を入力して, 相対応答変位の振幅と位相角(あるいは実部と虚部)が出力できる。すなわち, 相対応答変位を $U_r (= u_r \sin(\omega t + \phi))$ の形で表し, 入力加速度を $(-A_g)$ とすると絶対応答加速度 A_a は以下で与えられる。

$$A_a = A_g + A_r = A_g + \dot{U}_r$$

$$= a_g \sin \omega t + (-u_r \omega^2) \sin(\omega t + \phi) \quad (1)$$

b) 発生モーメント

タワー部に生じる発生モーメント M と計測した歪 ϵ の関係は式 (2) の通りである。

$$M = E Z \epsilon = 2 I / D E \epsilon \quad (2)$$

ここで, E はヤング係数, $Z (= 2 I / D)$ は真鍮パイプの断面係数である。 I は真鍮パイプの断面2次モーメント, D は直径である。主な解析結果を下の表-5に示す。

表-5 解析結果

	周波数 (Hz)	2.0	3.1	3.5
絶対加速度 (cm/s^2)	ゴム無し	170.2	1700.	773.2
	ゴム有り	181.1	1170.	564.4
発生モーメント (中央部)	ゴム無し	61.7	294.0	196.0
	ゴム有り	76.4	411.6	142.1
発生モーメント (下部)	ゴム無し	119.5	539.0	235.2
	ゴム有り	136.2	646.8	181.3

注) 発生モーメントの単位は N cm

5. 実験結果

(1) 風抗力係数

ここでは, タワーに取り付けた歪の計測値より曲げモーメントを算定し, ハブ軸までの距離で除して風荷重 F_w が実験から得られることから, 風車の特性を示すため風抗力係数を算出した。風荷重は, 円盤としてのローター全体面に作用すると見なし計算するか, ブレードとハブ・ナセルに作用する風抗力として算定するのが一般的である。ここでは, ローター回転時及び停止時それぞれに対応し, 式 (3) から抗力係数 C_d を算定し求めた。その際, タワー部及び停止時のナセルの C_d は 1.0 と算定した。ローター回転時及び停止時の抗力係数を図-5, 6に示す。

$$C_d = \frac{2 F_w}{\rho A v^2} \quad (3)$$

$$\rho = 0.132 \times \frac{273}{t + 273} \times \frac{P}{760} \quad (4)$$

F_w : 風荷重 (N) ρ : 密度 (kg/m^3)
 A : 投影面積 v : 風速 (m/s)
 t : 風温 ($^{\circ}\text{C}$) P : 気圧 (mmHg)



図-3 ローター停止時

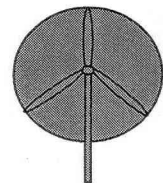


図-4 ローター回転時

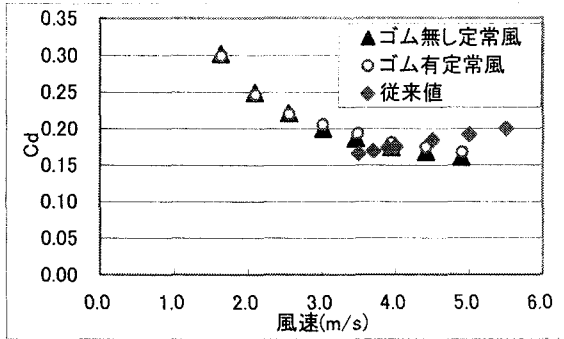


図-5 ローター回転時

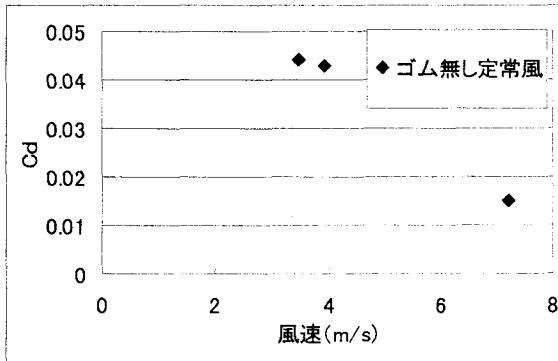


図-6 ローター停止時

ローター回転時における円盤としての抗力係数は、同ブレードを用いた従来結果と同程度の値であり、風速によらず0.15~0.3の範囲に分布し、風速が大きくなるにつれて小さくなる。これはレイノルズ数の影響と思われる。

一方、ローター停止時におけるブレードの抗力係数は0.015~0.05である。停止時においては、半径方向に向かってねじれているブレード面をできるだけ風と平行になるように取り付けた。したがって、抗力係数(ゴム無し)において当ブレードのねじりの無い場合の公表値³⁾である $Cd=0.02\sim0.04$ の値に近い結果が得られたと思われる。

(2) 絶対加速度

ここでは、 $98\cdot196\cdot241.8\text{cm/s}^2$ の入力加速度に対して得られたナセル部の応答加速度を 100cm/s^2 の入力があったとして正規化した。正規化した実験結果及び解析結果(100cm/s^2)を図-7, 8に示す。なお風速は 0m/s としている。

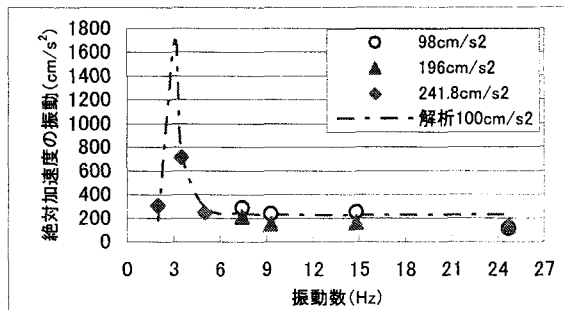


図-7 絶対加速度と振動数の関係(免震ゴム無し)

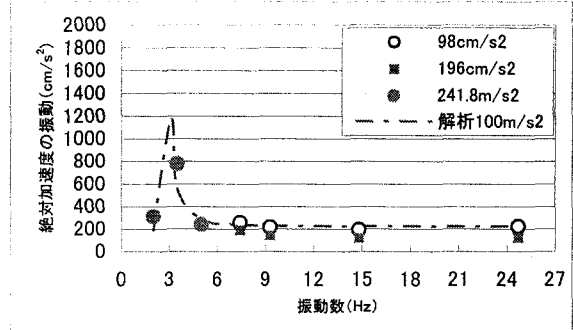


図-8 絶対加速度と振動数の関係(免震ゴム有り)

加速度振幅 $98\cdot196$ 及び 241.8cm/s^2 の規則波地震動に対し免震ゴム有無の2ケースについて計測を行った結果、約 3.0Hz で共振を起こした。共振点付近では免震効果は十分ではなかったが 7.4Hz 以上の高振動数領域では応答が低下し免震効果が得られた。免震ゴムがあると絶対加速度振幅が無い場合よりもかえって高い値が得られたが、これは共振によって加速度計取り付け部が緩んでしまったためかと思われる。免震ゴム無し・有りに対し 241.8cm/s^2 の加振加速度に対し、最大加速度応答がそれぞれ $1800, 1900\text{cm/s}^2$ となり 7.4 及び 7.9 倍の応答倍率となった。したがって、共振点における減衰定数はそれぞれ $6.7, 6.3\%$ に相当する。

(3) 発生モーメント

ここでは、歪ゲージB点及びC点の計測値より式(2)を用いて発生モーメントを計算し解析値と比較した。その結果を図-9, 10に示す(実験条件は風速が 0m/s 、加振加速度は 98 及び 241.8cm/s^2)。

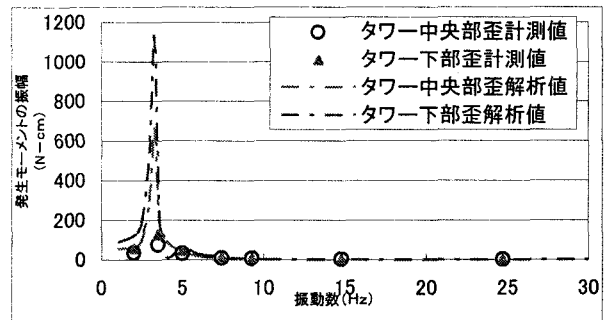


図-9 発生モーメント振幅～加振動数の曲線(免震ゴム無しモデル)

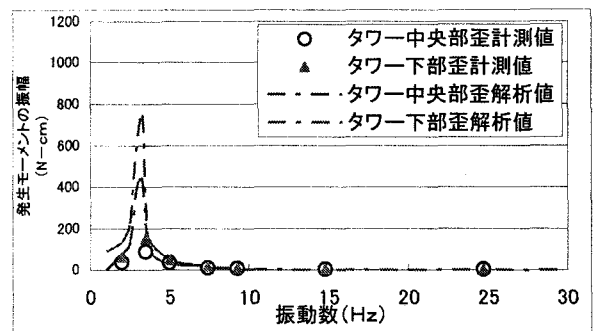


図-10 発生モーメント振幅～加振動数の曲線(免震ゴム有りモデル)

発生モーメントについては、実験値と解析値を比較した結果、共振振動数付近での実験結果(3.5Hz)も含め解析結果は実験値とよく一致する。また免震ゴム有ると、無い場合に比べ共振点付近で免震効果が発揮されている。なお解析に用いた減衰定数は、結果免震ゴムの有る場合は5.0%、免震ゴムの無い場合は5.3%であった。

(4) スペクトル解析

風が作用している間に地震動を受けると、風の変動成分と重なった応答となるので、スペクトル解析により標準偏差を求め応答値を整理した。即ち、風の有無に拘らず歪 ε 及び加速度 α の時刻歴波形に対しスペクトル解析を行い、それを $S_e(f)$ とする。これを積分して、分散 σ^2 を求める。

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} S_e(f) df \quad (5)$$

したがって、N波の最大値を求めると

$$\varepsilon_{\max} \approx (\sqrt{2 \ln N} + 0.577 / \sqrt{2 \ln N}) \sigma_\varepsilon \quad (6)$$

ちなみに、Nを1000とすると最大歪は標準偏差 σ_ε の3.86倍と表せる。

a) 歪応答

海上技術安全研究所及び構造実験室での実験から得られた歪応答は、基盤入力加速度が241.8及び98.0・196.0cm/s²とそれぞれ異なるので100cm/s²の基準加速度で得られた歪を正規化し表す。

$$\varepsilon / \alpha_g = \varepsilon_{\max} / 241.8, 196, 98 \quad (7)$$

ただし α_g : 基盤に入力した地震波の振幅

ε_{\max} : 最大ひずみ とする。

こうして得られた結果を図-11~14に示す。

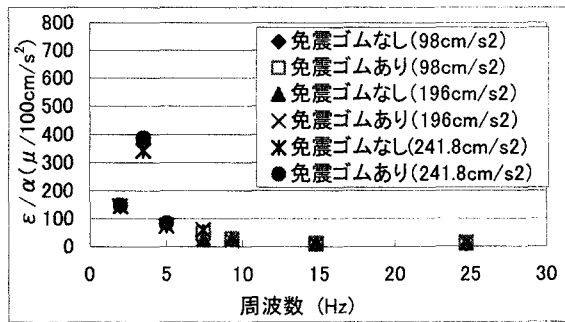


図-11 タワー中央部歪/加速度(風無し)

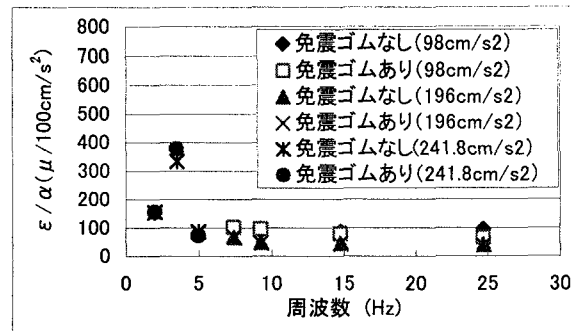


図-12 タワー中央部歪/加速度(風有り)

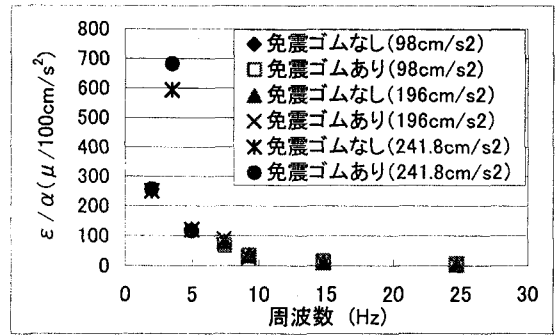


図-13 タワー下部歪/加速度(風無し)

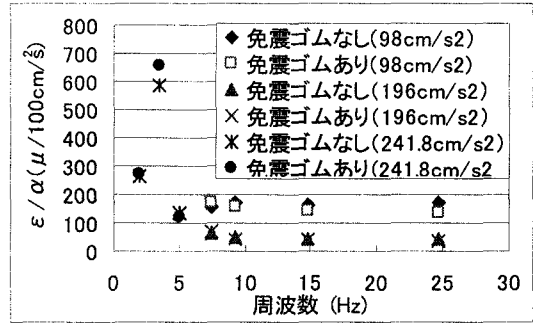


図-14 タワー下部歪/加速度(風有り)

風の有無による相異を比較すると、入力加速度が同じであっても風が有る方が7.4Hz以上の加振周波数域では最大歪が大きく分布する。よって、地震発生時においてもタワーは広い周波数領域で風による減衰影響を強く受ける。しかし、共振点付近では風の有無に関わらず同程度の歪が発生しているため、共振点付近では風による影響よりも地震動による影響が現れやすい。

免震ゴム有り・無しとを比較すると免震ゴムが取付けてある場合の方が歪は小さくなり免震効果が発揮された。

b) 絶対応答加速度応答

絶対応答加速度応答は、式(6)で得られた α_{\max} を用いて式(7)と同様に整理した。この結果を図-15, 16に示す。

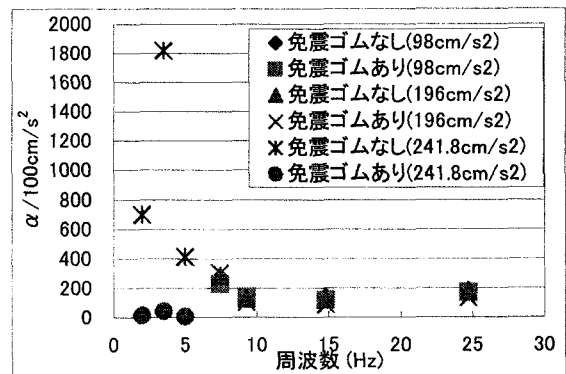


図-15 ナセル直上の加速度/基盤加速度(風無し)

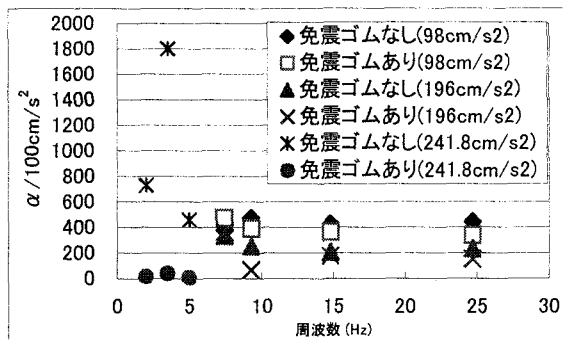


図-16 ナセル直上の加速度/基盤加速度(風有り)

絶対化速度応答に関しても、風の作用の有無の影響を比較した結果、全周波数領域において免震効果が発揮された。7.4Hz 以上の高周波数領域において風が吹く場合、加速度は同入力加速度の数倍と大きな応答結果を示した。免震ゴムのある場合の共振点加速度については極めて小さい。しかしながら、免震ゴムが無いと共振点付近では歪と同様に風の有無に拘らず加速度が同程度発生している。このことから、共振点付近では風の影響よりも地震動の影響の方が卓越することがわかる。

6. 結論

本研究では、風を受け発電している間に地震動を受ける洋上風力発電施設の挙動を明らかにし、さらに防振対策の効果を調べるため、振動模型実験及び動的解析を実施した。免震効果を把握するために、板ゴムをタワーと基礎部間に取り付け、発生歪や加速度にどのような効果があるか調べた。その結果、次のようなことが結論として得られた。

- (1) ローター回転時の円盤としての定常風に対する風抗力係数は 0.15~0.30 程度であり、ブレードについては 0.015~0.05 であった。
- (2) 免震ゴムを取付けたタワーに生じる歪に関しては地震動や風荷重の変動に対し広い周波数領域で効果があることが判明した。
- (3) 免震ゴムの有無に対応し共振点での曲げモーメントから減衰係数を推定してみるとそれぞれ 5.9%及び 5.3%を上回る。

(4) 241.8cm/s² の加振加速度作用時の共振点付近における最大加速度応答は免震ゴムが有無に対応し、それぞれ 1800・1900cm/s² となり、約 7.4 及び 7.9 倍の応答倍率となった。これは解析に用いた加速度から見ると、減衰定数はそれぞれ 6.7 と 6.3%に相当する。

(5) 風と地震波を同時に受けると、長短周波数の変動成分が重なった応答なるので、スペクトル解析により整理した。その結果、基盤加速度は同じであっても共振周波数では地震動の影響が卓越し、7.4Hz 以上の高周波数領域では風の影響が大きく歪及び加速度応答に現れる。

(6) 風が同時に作用する場合のスペクトル解析の結果では(4)の結論と異なり、共振点での加速度応答に顕著に免震ゴムの効果が認められた。

最後に、風向きと地震波の入射方向が同一の条件であるとして今回の実験を実施したが、現実には風向きと地震波入射方向が異なることが一般的である。その様な場合は、縦振動だけでなく横振動が複合された挙動になるものと考えられるので今後調べていく必要がある。

参考文献

- 1) O.Kiyomiya et al :Dynamic Response Analyses of Offshore Wind Energy Power Units during Earthquakes and Wind, The 20th Inter. Offshore and Polar Eng. Conf.ISOPE,2002
- 2) 関田欣治, 松川育史郎, 石川裕和, 林伸幸 :「風力発電施設の免震・制振法に関する基礎的実験及び解析」, 海洋開発論文集, VOL. 19, pp. 451~456, 2003
- 3) I.H.Abbott and A.E.VonDoenhoff: Thory of Wing Sections,pp.537, Dover Publications, Inc.1958
- 4) 社団法人土木学会 : 構造力学公式集構造委員会, 「構造力学公式集」, pp. 219, 1981