

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

FUNDAMENTAL EXPERIMENTS AND ANALYSES ON SEISMIC ISOLATION AND
VIBRATION-CONTROL FOR AN OFFSHORE WIND TURBINE STRUCTURE

関田欣治¹・松川育史朗²・石川裕和³・林伸幸⁴

Kinji SEKITA, Ikushirou MATSUKAWA
Hirokazu ISHIKAWA and Nobuyuki Hayashi

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東海大学 大学院 海洋学研究科海洋工学専攻

⁴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)

In order to lessen vibrations caused by wind and wave loads, and rotational forces of blades acting on an offshore wind turbine, as well as oscillations by earthquakes, we studied to clarify the effect of seismic isolation and vibration-control mechanism attached to such a tower-like-structure. The scale model tests (1/55) were conducted for a blades-nacelle-tower-foundation structure of a 1500kW wind generator at the top. Two kinds of isolation rubbers are fixed onto the foundation against earthquakes, while sloshing dampers are set to top of tower beneath a nacelle against the other vibrations. Both free and forced oscillation tests by rotating three blades were carried out for the models mounted either mechanism respectively. Meanwhile a response experiment of the model with sloshing dampers was carried out in a wind tunnel to determine the damping constants by comparing with the modal analysis. The paper describes the effects on vibration-reduction by these mechanisms as comparison of magnitude of responses and damping ratios.

Key Words: *Offshore wind turbine, vibration and oscillation, seismic isolation and vibration-control mechanism, damping, dynamic analysis*

1. はじめに

近年、環境問題への意識の高まりから、温室効果ガスであるCO₂をほとんど排出しない自然エネルギーに注目が集まっている。私達の生活を支えるベースエネルギーは火力発電・原子力発電であるとしても、これらは有限である化石燃料の大量消費とCO₂の排出および、人間・生物に多大な影響を与える可能性の高い放射性廃棄物の処理など、様々な問題を抱えている。それに対し、風力発電は自然から生み出される風(空気の移動)により発電されるため、環境に有害なガスの放出がなく、人命を危ぶむような廃棄物も排出をしない。そのためか、再生可能なエネルギーとしての風力の普及は目覚ましく、世界の設備容量は毎年約30%の割合で増え続けている。

しかしながら、海外では風力発電の商用段階にある一方、山岳地が多く風速や風向の変動が大きい我が国に風力発電施設を設置するには、各サイトの風況に合った発電機械を設置することが必要

となる。また、エネルギー分布の密度が若干小さく変動も大きいため発電出力の安定化や、高圧の系統整備や建設コスト低減も重要な課題であり、その結果導入が進展しておらず、まして洋上発電は未だ実現していないのがわが国の現状である。

それでも、地域によっては今後主要な電力源になる可能性があると思われ、その場合様々な問題を引起す可能性のある振動の削減対策は必ずクローズアップされてくると予想される。

2. 研究目的

風力発電施設は、ローターの回転による遠心力等に起因する振動力、発電の源である風がローター、ナセルやタワー部に作用する変動荷重、基礎構造に作用する地震動、さらには洋上では海中基礎構造に繰り返し作用する波浪などを受ける。これら様々な振動要因により、風力発電施設には逆さ振り子のような1次モードの振動や水面部が大きく揺れる2次、3次モード的な振動が発生し、こ

れが大きい場合はタワーが倒壊したり、構造部分に疲労損傷を生じさせる危険性がある。これは、風力発電がさかんに行われているヨーロッパに比べ、わが国における自然環境の変動性が大きく、比較的厳しい気象条件であるため、一層深刻になると予想される。したがって、このような常時や異常時の自然環境条件における構造強度や変形性能を適切に評価し設計しなければならない。特に経済性の観点から、20年以上の長期耐久性を必要とするため、この振動を的確に小さくすることができれば、安全性の高い風力発電施設を建設できると思われる。

そこで本研究では、風力発電施設模型に高層ビルや地震対策に用いられる免震装置あるいは制振装置を取付けることとし、すなわち地震に対しては免震装置を、風に対しては制振装置を取付け、両者について自由振動実験、加振装置による強制振動実験を実施した。また制振装置に関しては風洞実験も行った。前者二つの実験から、風力発電施設における免震・制振性能の確認を行い、さらに後者の風洞実験によって得られたタワー部のひずみ時刻歴結果とモーダル法による応答解析結果を比較し減衰係数を求めることにより、制振性能を評価した。

3. 実験装置及び実験方法

(1) 実験装置

a) 風力発電施設モデル

風力発電施設モデルは、実機としてはNEG MICON社製風力発電施設を想定し、縮尺は1/55（フルード則適応）として、図-1に示すような実験模型を製作した。風車とタワーは、3枚のブレードに回転を制御できるよう遊星ギア付モータに接続し、それをナセルとした。支えるタワーは真鍮製であり、中央で剛性を合わせた一様断面とした。

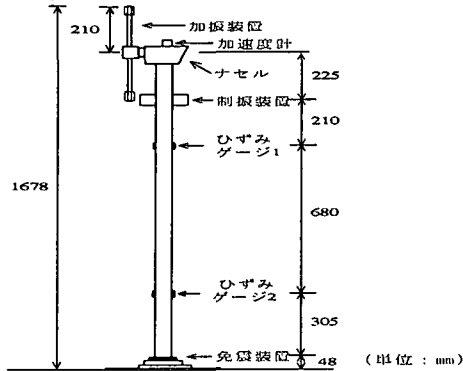


図-1 風車とタワー模型

b) 加振装置

強制振動実験で用いる加振装置について述べる。今回製作した加振装置は揺れを作り出す装置である。これは、3本の加振棒先端にあるウエイトの位置をずらすことにより揺れ幅を変化させることができる。また、モータの回転数を制御することにより、実験模型のタワー頭部に様々な振幅と周期

を有する揺れ荷重を与えることができる。図-2に加振装置および加振棒を示す。

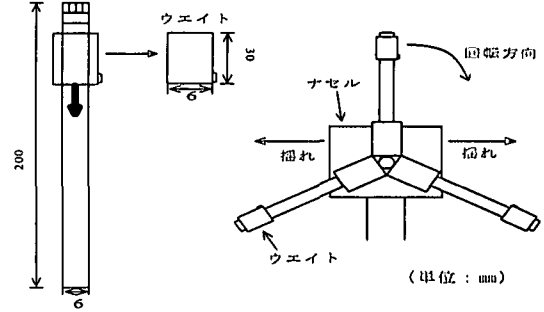


図-2 加振装置および加振棒

加振装置の原理については、加振棒先端に固定するウエイトの重量をMとし、1つの棒の水平軸に対する角度(θ(t))とすると、等速(v)では水平方向の加振力は

$$F(t) = M \frac{v^2}{r} \left\{ \sin\theta(t) + \sin\left(\theta(t) + \frac{2\pi}{3}\right) + \sin\left(\theta(t) + \frac{4\pi}{3}\right) \right\} \quad (1)$$

となる。これにより、上下と左右の加振が可能となるが、本実験では水平加振のみに注目した。

c) 風力発電施設に利用できる免震・制振装置

制振構造の分類¹⁾を図-3に示す。今回の実験で用いた免震・制振装置は、免震装置は、ゴムを用いたゴム支承、制振装置には、風力発電施設への適応と設置の容易さを考えてスロッシングダンパを用いた。表-1にスロッシングダンパの固有振動数の算定式²⁾を示す。

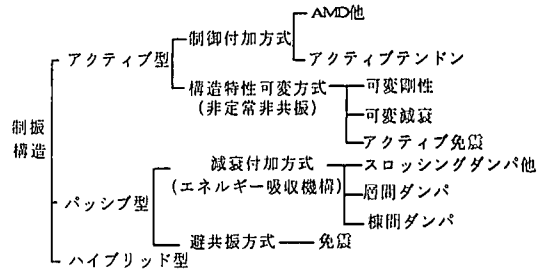


図-3 免震・制振装置の分類

表-1 矩形タンクと円筒形タンクの1次スロッシングモードの固有円振動数ωの計算

矩形タンク	円筒形タンク
$\omega^2 = \frac{1.58g}{1} \tanh(1.58 \frac{h}{1})$	$\omega^2 = \frac{1.84g}{R} \tanh(1.84 \frac{h}{R})$

免震装置に用いたゴム支承は、タワー直径に合うようなゴム帯またはゴム板を使用した。図-4のゴム支承は、既設のタワーに取付ける方法と、初めからタワーを支える方法で取付ける二つの方法を採用した。制振装置は、タワーに取付けできそうなキャップ状の容器をサイズ別に2個または4個用いた。図-5のスロッシングダンパについては、

実機ではタワー内部に多段積みされ内蔵されると想定したが、模型実験ではタワー外周に図のように取付けた。なお、本来ゴムのせん断剛性も模型実験の縮尺にあわせて弱めねばならないが、適当な材料がなかったのでそのまま使用した。

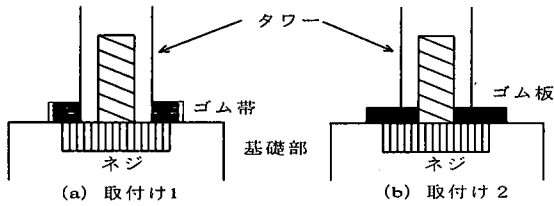


図-4 免震装置の取付け方法

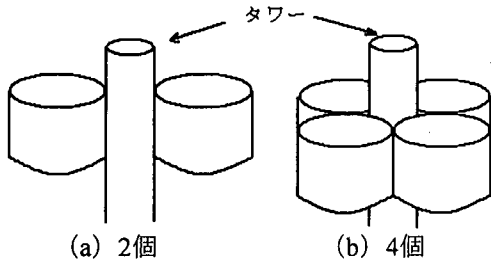


図-5 制振装置の取付け方法

(2) 実験方法

a) 自由振動実験

今回は、地震を想定した振動台での実験ができなかったため、免震装置については自由振動実験とb)の強制振動実験のみ行った。タワーに免震・制振装置の取付けの有無の状態でのナセル部に糸とばね量りを取付け、ナセル部後方に引っ張り荷重を与える。この荷重が500gで一定になった所で糸を放し自由振動を起させる。この時にタワーに生じる前後の振動に対して加速度計とひずみゲージを用いて測定し、揺れに対する免震・制振装置の有無状態での効果を比較・分析した。実験で使用した免震・制振装置の配置と条件を図-6、表-2、表-3に示す。

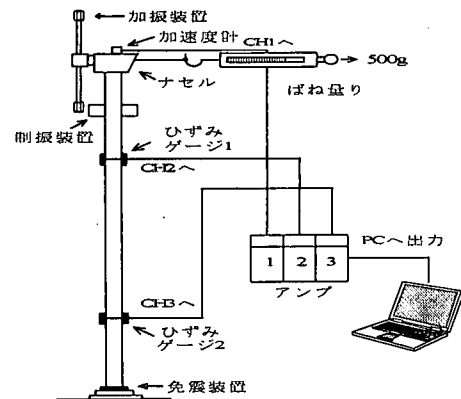


図-6 実験模型とセンサーの配置

表-2 免震装置

直径 (mm)	個数	太さ (mm)	枚数	厚さ (mm)
14.8	1	9.6	1	3

表-3 制振装置

直径 (mm)	個数	重さ (g)	水深 (mm)	固有周期 (s) ※
18.0	2	26	10	0.143
	4	52		
25.0	2	56	10	0.174
	4	112		
32.5	2	78	10	0.209
	4	156		
39.0	2	104	10	0.236

※スロッシングダンパ内には水を張る。

固有周期はスロッシングダンパ1個の値。

b) 強制振動実験

強制振動実験は、水平方向に振動を発生する加振装置を取付けたナセル部モータに回転制御装置と直流電源を接続し、直流電源の供給電圧を12V一定として、回転数制御装置により一定間隔で回転数を上昇させてタワーに生じる振動に対しての加速度・ひずみの変化を測定した。そして測定した加速度・ひずみ時刻歴記録をスペクトル解析することで周波数特性を調べた。実験で使用した免震・制振装置の配置と条件を図-7、表-4、表-5に示す。

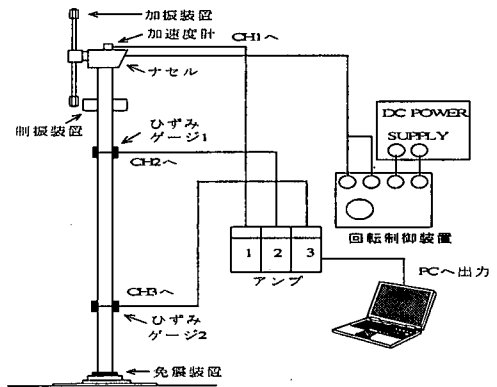


図-7 実験模型とセンサーの配置

表-4 免震装置

直径 (mm)	個数	太さ (mm)	枚数	厚さ (mm)
14.8	1	9.6	1	3

表-5 制振装置

直径 (mm)	個数	重さ (g)	水深 (mm)	固有周期 (s) ※
18.0	2	26	10	0.143
	4	52		
32.5	2	78	10	0.209
	4	156		

※自由振動実験と同じ条件。

c) 風洞実験およびモーダル応答解析

前にも述べた通り、今回は地震に対する装置の関係上などの理由から免震実験は行わず、風に対する制振装置のみを風洞実験場で行うこととした。本実験では強制振動実験と同じ条件で行った。風洞実験には、(独)海上技術安全研究所にある変動風洞施設を使用した。実験では模型には表-6

に記す風速を与えることにより発生するタワーの振動について測定を行った。実機風速2.3m/sはカットイン風速に相当し、風速30m/sはやや大きいがかットアウト風速に対応する。風速54m/sは参考値に実施したものである。この実験によって実際の風力発電施設に近い条件で制振装置の効果を検討できると考え、実験で得られたデータをスペクトル解析し、周波数と振幅の関係の考察を行った。

また、図-8に実験装置の配置、表-7に制振装置の仕様条件を示す。

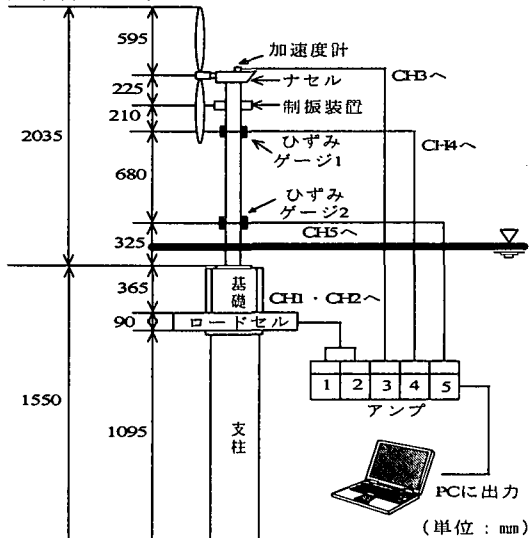


図-8 実験模型とセンサーの配置

表-6 風洞実験における風速

	風洞装置	実機スケールにした場合の風速
風速 (m/s)	0.31	2.3
	3.96	30
	※7.24	54

※風速7.24m/sは、実機スケールでは暴風域となり風車での発電は行わない条件である。

表-7 制振装置

	直径 (mm)	個数	重さ (g)	水深 (mm)	固有周期 (s) ※
スロッシングダンパ※ (SD)	18.0	4	52	10	0.14
	32.5	4	156	10	0.21

※自由振動実験と同じ条件。

モーダル法による振動解析³⁾では、ローター・ナセルとタワーおよび海中部の質点からなる多自由度系にモデル化して構造物の挙動を把握する³⁾。その運動方程式は各質点の変位ベクトル(x)に対し次式のようになる。

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = P_{WIND}(t) \quad (2)$$

固有値問題により求めた固有円振動数ベクトル(ω_n)とモードマトリックス「Φ」を用いて、時間のみ関数である一般化座標(q)を導入する。

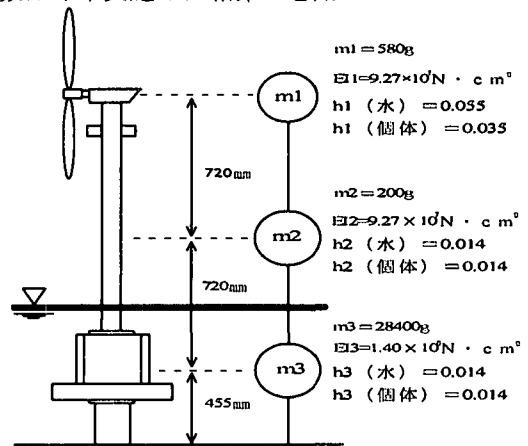
$$q = [\Phi]x \quad (3)$$

この関係から、(3)式はモードマトリックスの直交性を用い、運動方程式はn個の独立の1質点系の振動方程式(4)式が得られる。各係数は一般化質量(M_n)、一般化減衰(C_n)、一般化剛性(K_n)、一般化外力(P_n)と言われるものである。

$$M_n \ddot{q}_n + C_n \dot{q}_n + K_n q_n = P_n(t) \quad (4)$$

(4)式により任意波形外力に対する1質点系の微分方程式の解は数値解析的に簡単に求まる。一般化座標における得られたn個の変位から、(3)の関係を使ってそれぞれの質点での変位(x)が得られる。

モーダル解析を進めるにあたり、図-9のように実験模型をモデル化した。実験模型全体を3つの要素に分割し、それぞれに質量、減衰定数、剛性EIを与えた。これらの3種類の値のうち、水中部の付加質量は1次固有周期が合うようにきめ、ローター部分の減衰定数のみを仮定し与え実験波形と合う最適値を繰り返し求めた。タワーと水中部の減衰定数は昨年実施した結果³⁾を用いた。



注) h1~3 (水)・・・スロッシングダンパ有り
h1~3 (個体)・・・スロッシングダンパ無し

図-9 実験模型のモデル化

4. 実験結果

(1) 自由振動実験

免震装置については、ゴムの弾性係数の縮尺は満足して無いので過大な評価となるものの、表-8に示すように装置有りの場合が装置無しより固有周期が0.5sが0.75sになり、減衰定数も1.1%から8.7%と大幅に変化し、高い免震性能が得られた。スロッシングダンパ制振装置では、質量の影響で固有周期は長くなるのは当然であるが、装置を取付けた方の固有周期がその分長くなり、減衰定数は1.1%から1.3%と少しだけ変化した。

表-8 免震装置を用いた自由振動の結果

	ゴム支承	装置無し	ゴム帯	ゴム板
固有周期 (s)		0.5	0.57	0.75
減衰定数	加速度	0.014	0.053	0.099
	ひずみゲージ1	0.011	0.029	0.087
	ひずみゲージ2	0.017	0.028	0.086
	平均値	0.014	0.037	0.091

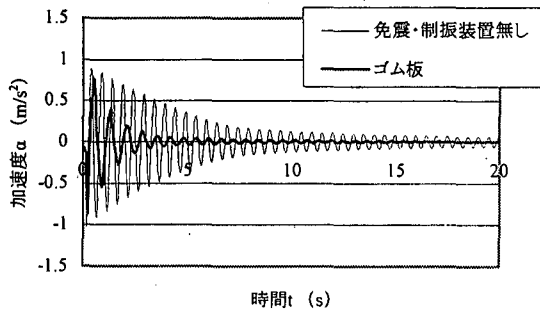


図-10 免震装置の有無による自由振動時の加速度の違い

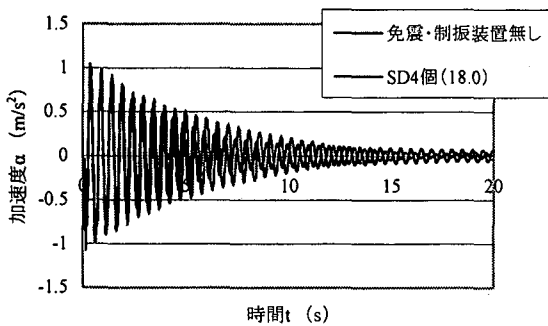


図-11 制振装置の有無による自由振動時の加速度の違い

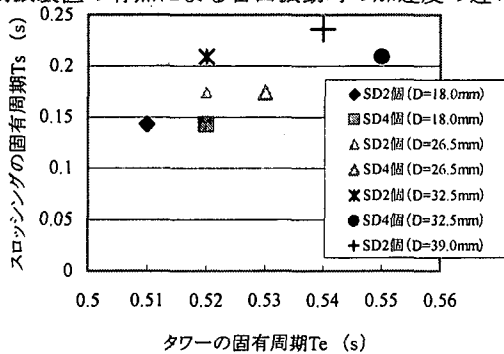


図-12 固有周期とスロッシング周期の関係

(2) 強制振動実験

免震装置は、図-13より装置が無い状態よりひずみスペクトルのピーク密度で $50 \mu^2s$ から $32 \mu^2s$ と振動を低減することが確認できた。制振装置は、質量により固有周期が変化するので、質量の影響を排除するためスロッシングダンパ内に水ではなく固体（粘土）を入れたものも用いた。この固体を使用したスロッシングダンパを装置無し、水を張ったスロッシングダンパを装置有りとして比較したものを図-14に示す。

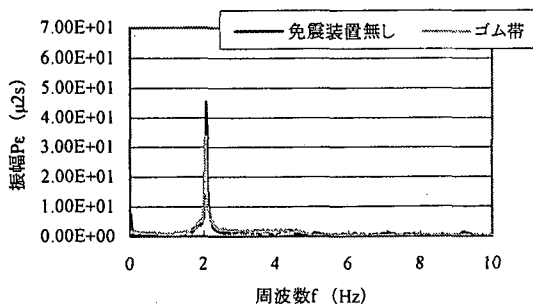


図-13 強制振動時のひずみゲージ1のスペクトル解析

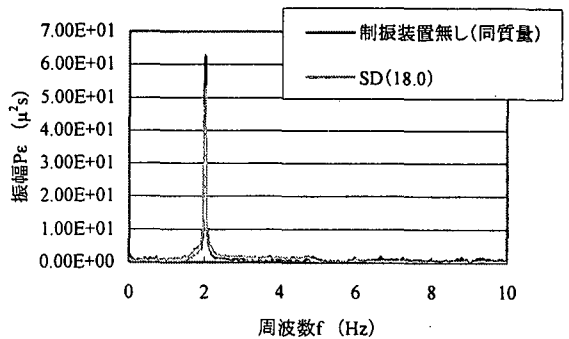


図-14 強制振動時のひずみ1スペクトル解析

スペクトルのピーク密度をみると、装置無しの状態より約 $60 \mu^2s$ から $50 \mu^2s$ へと減衰効果が表れ、両者とも常に風を受けて揺れる風力発電施設には十分に対応できると思われる。

(3) 風洞実験及びモード応答解析

風洞実験で制振装置を使用する場合も強制振動実験と同じように固体を用いたが、ここでは質量の影響に対してだけでなく、風の影響を受けるので受圧面積が同じなるよう同サイズのスロッシングダンパ内部に水または固体を入れ比較した。その結果、制振装置の中に水を張った方が同質量の固体を入れた装置よりも低減効果があると判明した（図-15、図-16参照）。

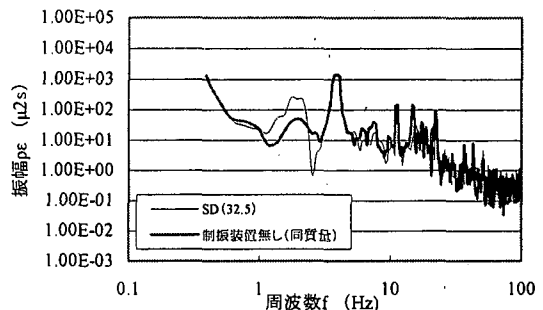


図-15 風洞実験（風速3.96m/s）時のひずみゲージ1のスペクトル解析

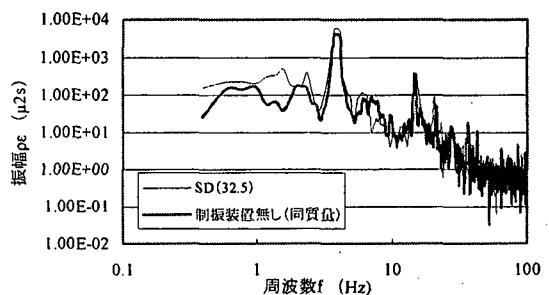


図-16 風洞実験（風速3.96m/s）時のひずみゲージ2のスペクトル解析

表-9 風速3.96m/s時の最大期待値

	ひずみゲージ1				ひずみゲージ2			
	18		32.5		18		32.5	
スロッシングダンパ	水	固体	水	固体	水	固体	水	固体
平均値	34	35	34	35	51	53	61	59
標準偏差	36	39	41	41	60	62	66	62
最大期待値	106	112	116	118	172	176	192	183

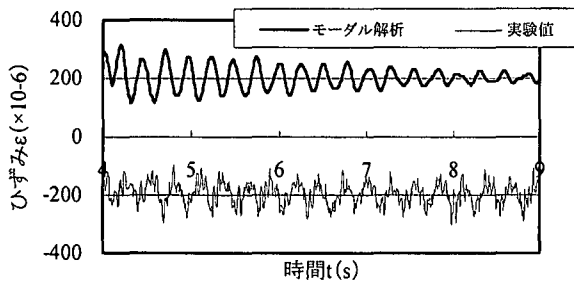


図-17 制振装置有り(水)での実験結果と解析との比較

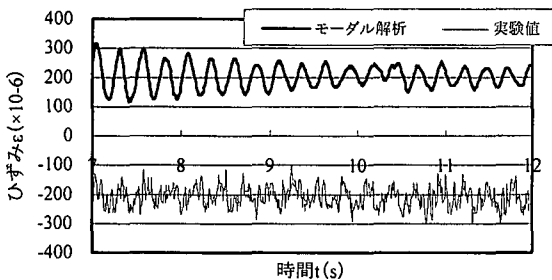


図-18 制振装置無し(固体)での実験結果と解析の比較

また、不規則的変動量なので、表-9に応答の平均 (m) と標準偏差 (σ) を求め、ここでは、 $m + 2\sigma$ で代表させた最大期待値を示したが、最大期待値、平均および標準偏差とも、装置有りの状態が装置無しに比べ小さく、減衰効果が若干みられた。

次に、モーダル解析により、ひずみ応答の波形から制振装置有り・無しの実験と比較した。図-17と18に示すように、解析値には高振動成分が多少表れるものの、装置を取付けた場合も無い場合も主要振動成分は実験値と概ね一致する。装置を取付けた場合の図-17における減衰定数は質点1のみに5.5%の減衰を与えたものである。これに対応し、装置の無い場合の解析と実験によって得られた振動波形である図-18は3.5%と小さい。したがって、実験によって得られた振動波形とよく一致するまで、何度も減衰定数を仮定して繰り返し行ったモーダル応答解析との比較によって、スロッシングダンパの風に対する制振性能が確認されたと言える。

5. 結論及び今後の課題

風力発電施設の1/55縮尺実験模型を用いて、風力発電施設の免震性について、自由振動実験、強制振動実験を、制振性についてこれらに加え、風洞実験も行い、得られた風力発電施設の免震・制振性について結論を今後の課題を含めて述べる。

(1) 免震装置

既設の風力発電施設に取付けるゴム帯と、風力発電施設の建設時に取付けるゴム板の2種類を想定して実験を進めたが、自由振動実験ではゴム帯・板共に免震装置としての減衰増加と固有周期を長

くできることが確認できた。ゴム板の方がゴム帯より減衰効果があったが、ゴム帯も施設の規模に対応し幅や高さを適切に設定すれば有効と考えられる。強制振動実験は、ゴム帯は装置無しに比べて減衰性能がみられ、ゴム板については、ゴム帯ほど減衰効果が得られなかった。対処法としては、直接タワーを支持することになるので、ゴム板の耐力耐久性、装置の規模、個数を適切に考慮すれば減衰効果が高まると考えられる。

今後は振動台を用いた模型実験による免震性の評価や、ゴム材などを使用する場合はその剛性や荷重・変形特性による効果の把握が必要になる。当然、実際の設置物への取付けや安価な装置の開発が要求されるであろうし、風や波浪、ブレードの回転による振動や揺れを受けても風力発電施設のタワーや基礎構造物の振動低減が同時に図られ、風力発電施設の安全性を高めることが望まれる。

(2) 制振装置

設置費や経済性も施工性の点で優れていると考えて、スロッシングダンパ制振装置を用いて自由振動実験、強制振動実験、風洞実験を行ったが、自由振動実験では、免震装置ほど減衰効果は得られなかった。制振装置を取付ける箇所をタワー上部に集中して配置することに限定した実験を行ったが、タワーの中部や下部に設置することも考えられる。すなわち、疲労対策であれば応力範囲の大きい箇所にも、また台風時の倒壊が問題であれば発生する最大応力の大きい箇所に取り付けられれば有効であると思われる。一方、強制振動実験では、約60~75%程までピーク値が下がり、風洞実験においても、減衰定数が約30~45%に上がるので、制振装置は装置無い場合と比べて風に対する振動に減衰効果がみられた。

今後は、(1)の免震装置と同様に経済性の確認が必要であり、スロッシングの固有周期に合わせて減衰を高めるため、制振装置の個数や多段積み等の方法について検討を行うことが、風力発電施設の安全性向上のため肝要であると思われる。

参考文献

- 1) 鹿島 都市防災研究会：都市・建築防災シリーズ4 制振・免震技術，鹿島出版会，pp. 60-61，pp. 81-91，1996
- 2) 社団法人 日本流体力学会：流体力学ハンドブック，丸善株式会社，pp. 551-552，1998
- 3) 関田欣治，林辰樹：基礎構造が異なる海上風力発電の波浪及び風に対する振動特性の解析，土木学会，海洋開発論文集，第17巻，pp. 55-60，2001
- 4) 関田欣治，石川裕和，林辰樹，山下篤，矢後清和：洋上風力発電施設に作用する風抗力及び減衰定数に関する風洞装置を用いた基礎的実験，海洋開発論文集，Vol. 18，pp. 725-730，2002