

風車搭載可能なアーティクレートタワーの 風と波に対する応答実験

MODEL TEST ON THE MOTION RESPONSE TO WINDS AND WAVES OF AN
ARTICULATED TOWER CAPABLE TO MOUNT WIND TURBINE GENERATORS

関田欣治¹・石川裕和²・吉成岳彦³・野本由紀夫⁴・矢後清和⁵

Kinji SEKITA, Hirokazu ISHIKAWA, Takehiko YOSHINARI,
Yukio NOMOTO 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東海大学 大学院 海洋学研究科海洋工学専攻

⁴正会員 (株)緑星社 龍ヶ崎工場 設計部

⁵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)

While many articulated buoyant towers connected to a gravity base with a universal joint have been constructed for navigational aids on the sea bottom, such as in Tokyo bay, Japan's Coast Guard has planned to develop advanced navigation aids system to mark ships navigation routes by laser lights. This kind of heavy duty tower would also require added its stability and motion characteristics for the winds and waves. Therefore we conducted a 1/20 scale model test to measure wind loads acting to the deck of the tower and inclinations of the tower by using a wind and wave tunnel. In this study, first we obtain drag coefficients for wind loadings on the deck as well as added mass coefficients of the tower by the natural free oscillation test. Then we compared test results with time domain analyses to determine the inertia and drag force coefficients of the tower. The paper also describes the transverse oscillation due to steady and fluctuating wind, wave loadings and combined wind and wave loadings.

Key Words: Buoyant tower, articulated tower, dynamic analysis, wave and wind, model test

1. はじめに

現在でも、離島や岬の灯台などの電源を安定的に確保することは、依然課題である。それは送電線による電源の供給はコスト上現実的でないことによる。そのため、離島や岬の灯台などでは固定式波力発電や太陽光発電などとディーゼル発電機を併用した電源確保が一般的である一方、ペイロードが小さい航路標識灯などでは一部潮流発電なども試験されてきているものの、波力や太陽光と蓄電池を組合せた電源が広く利用されてきた。

後者の航路標識ブイは船舶が安全かつ能率的に航行するための支援施設であり、光波標識、電波標識、音波標識などがある。最近ではさらにレーザー光発信装置を設け、標識機能の向上を図ろうとする先端的航路標識ブイの研究がなされている。しかし、レーザー光を設けた場合の消費電力量はレーザー光発振やターゲット光源、ミラー制御駆動のため著しく増加するので、電源の確保は一層重要であり、従来の太陽光発電とバッテリーの組合

せに加え垂直軸型風車の搭載も考慮されている。

2. 研究目的

さて、東京湾などに設置される航路標識ブイは、海底の重力式ベースにブイ本体がユニバーサルジョイントで固定されるアーティクレートタワーと呼ばれる浮体構造物であり、水中部の浮力による復元力で流れや波浪などに抵抗するものである。中間に大きな浮力体を有するアーティクレートタワーにおいては、レーザー光の視認性を確保し、安定した発電を行なうためには、風と波に対する安定性と動的性能の両方が求められる。安定性を確保するためには浮力を大きくして復原モーメントを高めれば良いが、構造が大きくなりすぎて動揺性能が低下する。そこで本研究では、このような施設に風車搭載が可能かどうかを探るため、第1段階として、標識ブイが変動風と波浪を同時に受ける場合の応答特性を明確にすることを目的とし

て、風車のないアーティクレートタワーの1/20の縮尺模型実験を行なった。

実験では水深約20mの東京湾を想定し、模型実験における風速を4~10m/s(実機では17.9~44.7m/s)、規則波の波高を4~10cm(実機では0.8~2m)、その周期を0.8~2.3s(3.6~10.3s)とした。実験は以下の4項目からなる。

- 1) デッキ部に作用する風荷重測定により風抗力係数(Cd)を求めた。
- 2) 自由振動試験より固有周期を測定し、タワーの付加質量(Ca)を決定した。
- 3) 風と波に対するタワーの傾斜応答の実験と時間領域の数値解析により、タワー水中部の抗力係数(Cd)と慣性力係数(Cm)を明らかにした。なお、時間領域の解析においては、波浪の水粒子と剛体としてのタワー間の相対運動にもとづく抗力減衰を考慮した。
- 4) 風や波浪の方向(同一方向)に直角な横揺れ応答も測定し、カルマン渦に起因するような振動の有無を調べた。

3. 実験条件及び実験方法

(1) 実験装置及び風力発電施設モデル

実験は独立法人海上技術安全研究所の風水洞(風路部長さ15m, 幅3m, 高さ2m, 水路部深さ1.5m)を用いた。これは風と波を同時に発生できるものであり、世界的にも数少ない施設である。

実験では横浜港沖に設置されている航路標識ブイを研究の対象とし、実験装置の断面寸法、造風・造波性能等の制約から本実験の縮尺を1/20(フルード則適用)と決定した。

模型は中間部に直径15.4cmの円筒状浮力体を有する高さ141.0cmの円筒状タワーとユニバーサルジョイントで構成され、ロードセルと基礎を含めた水槽底部からの高さは187.8cmである。本実験では水位を155.0cmで一定とし、ユニバーサルジョイント中心から水面までの高さは96.6cm、水面下の投影面積は586.8cm²、水面上の風を受ける部分の図心までの高さは33cm、その投影面積は120.4cm²であった。タワー重量は2.12キログラム、重心は77.5cmである。模型重量が若干大きく模型の重心を実機に完全に合わせるのには難しかったので、縦揺れ応答特性が実機にできるだけ一致するよう固有周期14.5s(1/20模型で3.24s)が合うようにした。したがって、模型と実機とは重量、重心が異なるが、復元特性はほぼ一致していると言える。

タワー(直径4cm, 浮体部直径14cm)はアルミ製であり、下端はユニバーサルジョイントを介してロードセルに固定されている。また、タワーの揺れ幅を測定するため上部先端から風方向・風直角方向にワイヤーを張り、それらを変位計に接続した。ロードセルでタワーにかかる荷重を測定した。模型前方に風速計、そして模型の真横に波高計を

設置して風速・波高を測定した。(図-1参照)

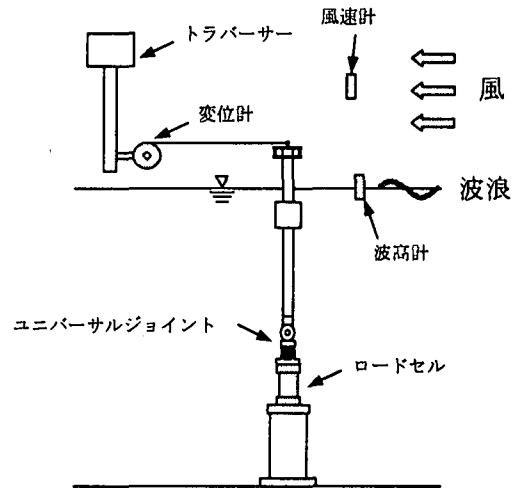


図-1 模型のセットアップと計測装置の配置

(2) 実験条件

湾口ではうねりの来襲も予測されるので長周期の波浪を含め、実験では、規則波単独、定常風と規則波、変動風単独、変動風と規則波の4条件とした。設定した実験条件を表-1に示すが、現地の最大波を再現するのは厳しいので、波高は1/20縮尺で31cmのところ10cmまで発生させた。風速については1/20縮尺で11.2m/sのところ10m/sまで発生させた。

表-1 実験条件一覧

(1) 規則波単独

	実機	模型実験
波高(m)	0.8, 1.4, 2.0	0.04, 0.07, 0.1
周期(s)	3.13, 3.58, 4.02, 4.47, 4.92, 5.37, 5.81, 6.26, 7.16, 8.05, 8.94, 9.84, 10.29, 11.18, 13.42	0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2, 2.3, 2.5, 3.0

(2) 定常風と規則波

	実機	模型実験
風速(m/s)	17.89, 31.3, 44.72	4.0, 7.0, 10.0
波高(m)	0.8, 1.4, 2.0	0.04, 0.07, 0.1
周期(s)	3.58, 4.92, 6.26, 8.05, 8.94, 10.29	0.8, 1.1, 1.4, 1.8, 2.0, 2.3

(3) 変動風単独

	実機	模型実験
風速(m/s)	2.24, 13.41, 20.12, 29.07, 33.54, 42.89	0.5, 3.0, 4.5, 6.5, 7.5, 9.5

(4) 変動風と規則波

	実機	模型実験
風速(m/s)	17.89, 31.3, 44.72	4.0, 7.0, 10.0
波高(m)	0.8, 1.4, 2.0	0.04, 0.07, 0.1
周期(s)	3.58, 4.92, 6.26, 8.05, 8.94, 10.29	0.8, 1.1, 1.4, 1.8, 2.0, 2.3

4. 実験結果

(1) 変動風の周波数特性

実験で使用した風は定常風と変動風の2種類である。実験で使用した風水洞では定常風しか発生することができないため、ネットにフラップをとりつけ外乱を当てることで強制的に変動風を発生させた。定常風は主として風荷重を、また変動風を用いて動的応答の把握をすることとした。

これらの定常風と変動風の測定記録からスペクトル解析を行い、風速1.51m/sについてそれぞれ無次元周波数特性を下記の図-2に示した。表示にあたっては、(3)と(4)式に示す定義の通り、縦軸は無次元スペクトル密度であり、横軸は無次元周波数である。

$$\text{無次元風速スペクトル: } f Su(f) / (Uz)^2 \quad (1)$$

$$\text{無次元周波数: } fz / Uz \quad (2)$$

ただし、 f は周波数、 $Su(f)$ は風速スペクトル、 Uz は水面高さ z における平均風速である。

無次元表示した理由は、Ochi(1988)などの提案したスペクトルは一般に次式の関係にあるためである。

$$f Su(f) / (Uz)^2 = F(fz / Uz) \quad (3)$$

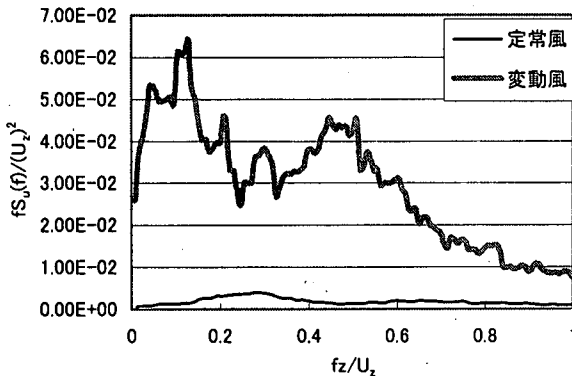


図-2 定常風と変動風のスペクトル

実験結果を整理すると以下のようにいえる。

- 1) 低風速ではOchi(1988)の提唱する海上風のスペクトルと類似の形状を有するスペクトルが得ることができたが、発生した変動風の風速が大きくなると、フラップが全開してしまい上記自然界のスペクトルに比較して若干小さい。
- 2) 定常風は変動成分が小さいので、周波数によらずほぼ一定のエネルギーとなる。すなわち、ホワイトノイズとなっていることがわかる。

(2) 抗力係数

定常風・変動風における風抗力係数(Cd)はどの程度なのかを、実験時の風温(t)と気圧(P)から得られた密度(ρ)を用いて抗力式により算定した。

$$Cd = \frac{2Fw}{\rho Av^2} \quad (4)$$

$$\rho = 0.132 \times \frac{273}{t + 273} \times \frac{P}{760} \quad (5)$$

ただし、

$$\left\{ \begin{array}{ll} Fw : \text{風荷重 (N)} & \rho : \text{密度 (kg/m}^3\text{)} \\ A : \text{投影面積} & v : \text{風速 (m/s)} \\ t : \text{風温 (}^\circ\text{C)} & P : \text{気圧 (mmHg)} \end{array} \right.$$

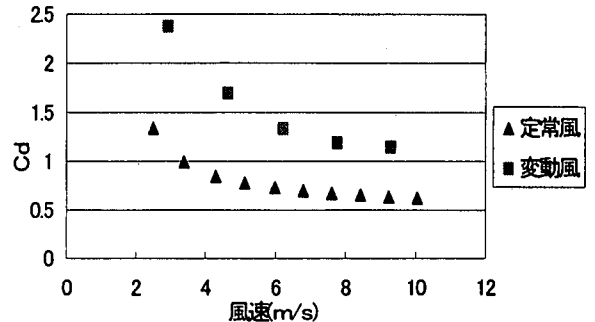


図-3 風速とCdの関係

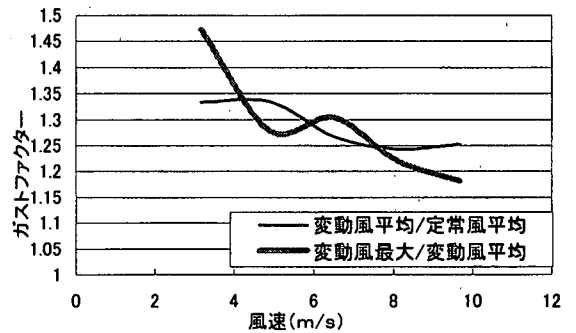


図-4 ガストファクターの推移

定常風における風荷重は、測定されたタワーの傾斜角に相当する復元モーメントから求めるが、ロードセルによる荷重から直接得られる。しかしながら、復元力から得られる荷重は直接荷重を測定するのではないので、ロードセルの測定結果をチェックする目的で使用した。測定結果、両者は風速が小さいとばらつき、約6m/s以上の風速になれば両者はよく一致した。したがって、風荷重についてはロードセルのデータを使用することにした。図-3に抗力係数を風速との関係で示した。ともに風速は平均風速である。結果としては、定常風、変動風ともに風速が増すにつれ風抗力係数(Cd 値)は減少するが、これはレイノルズ数の影響と実験方法上の誤差によるものと思われる。 Cd 値は両者とも風速6m/s以上でほぼ一定となり、定常風は0.6~0.7、変動風では1.2~1.3である。この定常風と変動風の Cd 値の相異をバフェティングと考え、図-4に示すように両者の風荷重から(1)式により風速比(ガストファクター)を求めてみると、1.2~1.4程度にあった。図-4には変動風に対する最大風荷重と平均風荷重の比から求めた風速比も示した。以上から、風速が大きくなると実験装置の制約上、十分乱れを与えられないことに起因しガストファクターが小さくなるのが分かる。

(3) 波浪に対する応答

自由振動から得られた付加質量($C_a=0.3$)をもとに、慣性力係数(C_m =一般部1.3, 中間部1.4)として解析したものが図-5の理論値である。解析法は参考文献に詳細が述べられているのでこれらを参照するとして、水中部分は15要素に分割し、また水上部分はデッキとタワー部とし、それぞれの要素に作用する風荷重や流れや波浪荷重をモリソン式で与えた。抗力は各要素重心と水粒子速度の相対速度に依存した解析を時間領域で行った。水中部のタワーの抗力係数(C_d)は0.8と1.0および1.2として解析結果を示した。縦揺れ角の実験値と理論値が周期1s以下であまり合わないのは、短周期では側壁を含めた反射波の影響が入り安定した波が発生できなかったためである。他に、抗力係数(C_d)や慣性力係数(C_m)値が小さすぎたためか、あるいは微小振幅波としているため考慮できない波浪の有限振幅性が原因とも考えられ、微小振幅波による解析では参考文献にも示したストレッチ法の適用などが必要かもしれない。しかしながら、長周期になると実験値と解析値は良く一致し、 C_d は0.8~1.0の範囲にある。全体としては、抗力係数0.9、慣性力係数1.3程度とすれば良いと思われる。周期1.3s付近では相対減衰項のためか、解析値が不安定になる。

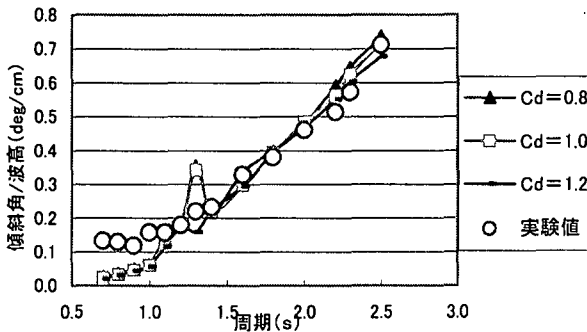


図-5 周期と縦揺れ角の関係

(4) 波浪および風に対する応答

下の図-6には縦揺れの最大傾斜を波浪周期に対してプロットしたものである。(2)で述べた方法により得られた理論値が規則波単独のものである。ただし、 C_d は0.8としており、周期は0.8s以上の結果を解析した。規則波単独の理論値に風荷重による静的傾斜を加えたものが、ここでは定常風と波浪下の最大傾斜に関する理論値とした。定常風と波浪下の理論値は周期が短いと実験値より若干小さい。一方、変動風と規則波が作用する場合は、波浪単独の傾斜角にガストファクター1.4を考慮し定常風作用時の傾斜角を加えた理論値と比較的良く合う。

一方、図-7の風速4m/sと7m/sでは規則波単独と定常風・変動風をそれぞれ重ね合わせた理論値より、実験で同時に作用させた実験値の方が傾斜角は大きい。また、変動風と規則波は全体的に理論

値に近い点が多い。定常風と規則波にも近い点は存在するが、全体的に理論値より上回っている点が多い。

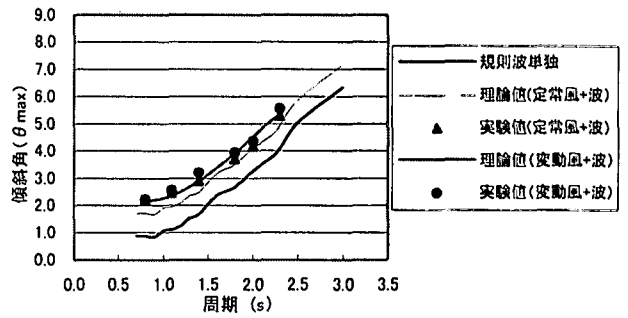


図-6 実験値と理論値の比較(風速4m/s)

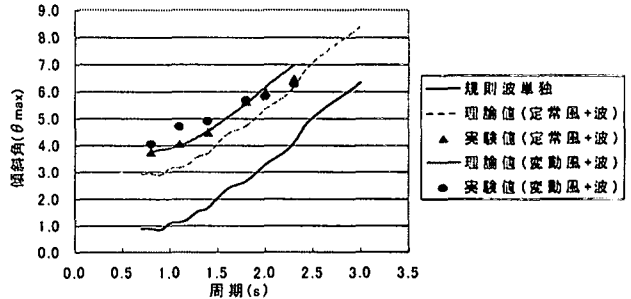


図-7 実験値と理論値の比較(風速7m/s)

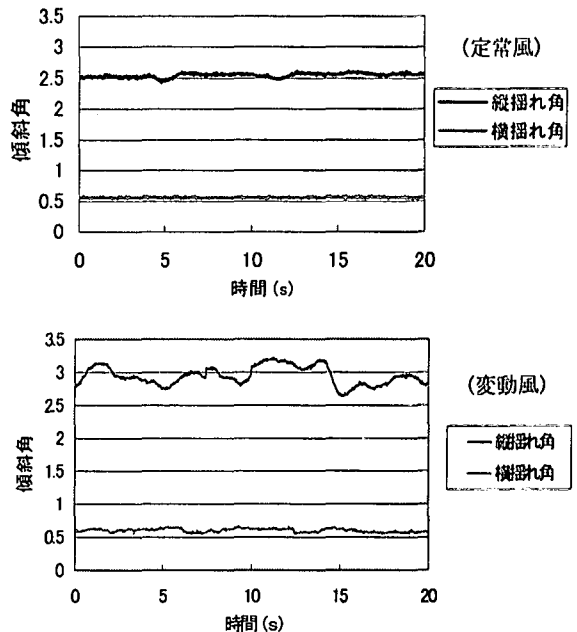


図-8 定常風・変動風による揺れ角の時刻歴

(5) 縦揺れ角と横揺れ角の時刻歴

前述の横浜港沖に設置されている航路標識ブイで、10m/sを超える強風時に縦揺れのほか、横揺れも現地で観測されているという報告もあり、ここでは定常風単独、波浪単独および定常風・規則波同時作用下でのタワーの縦揺れと横揺れを測定した。図-8に、定常風(風速6.81m/s)がタワーに作用する方向の縦揺れ角と定常風直角方向の横揺れ角の時間的変化を示すが、変動成分は若干縦揺れが大きい。一方変動風(平均風速6.23m/s)では、全振幅0.7°程度の縦揺れが生じている。これに対

し、横揺れ変動成分ははるかに小さく縦揺れの1/7程度である。横方向の静的傾斜はセンサーによるものであり、これを無視して考えると、タワー後流域のカルマン渦の発生が原因となり、横方向の揺れが生じたものと考えられる。また、波浪単独ではカルマン渦が発生しにくいいため横振動がほとんど発生しない。

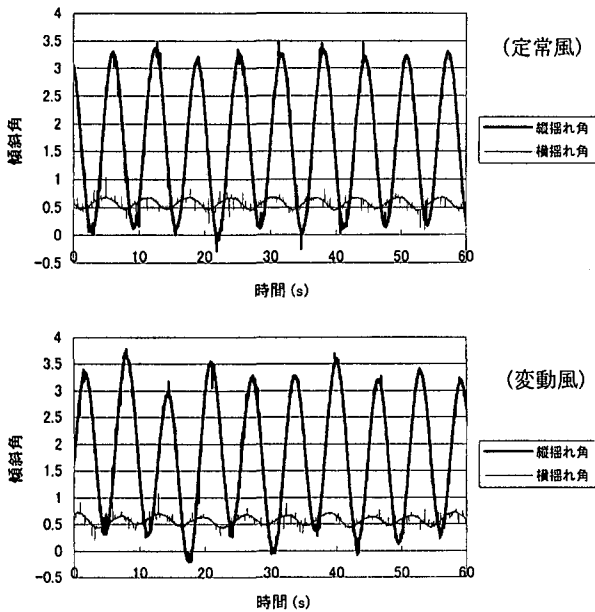


図-9 定常風・変動風と波による揺れ角の時刻歴

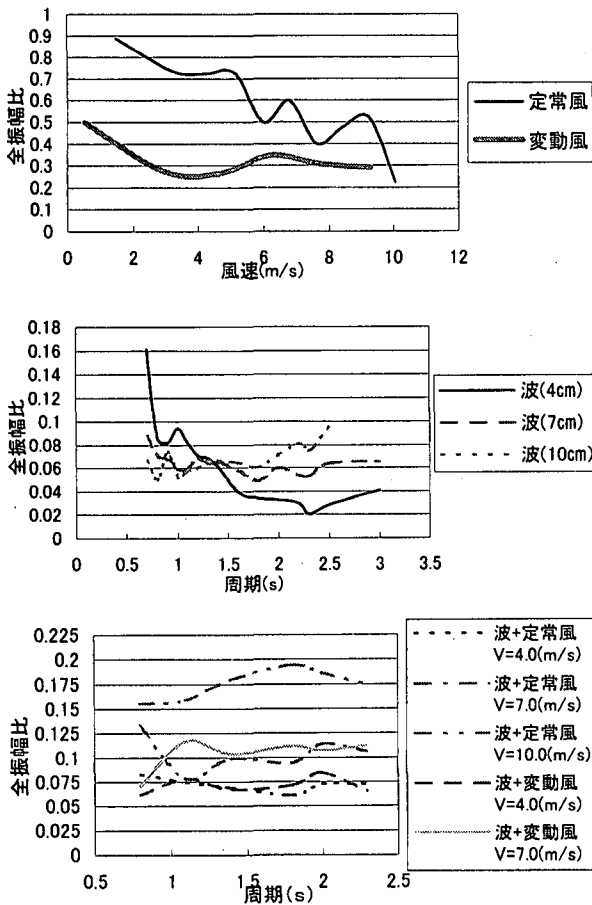


図-10 全振幅比と風速・周期の関係(波高7cm)

次いで、定常風あるいは変動風と規則波同時作用時の縦揺れと横揺れの時刻歴を図-9に示す。実験条件は波高7cm、周期1.4sであり、平均風速が両者とも約4m/sである。波形からわかるように、風荷重による振動が卓越するため、固有周期で揺れそれに波浪周期に対応する振動が重畳した振動となっている。横揺れが目立たなく、変動振幅としては縦揺れの10%程度以下であった。また、定常風と変動風の違はこの周期ではほとんどない。風速や周期の違いによる影響をみるため、縦揺れと横揺れの全振幅比(横揺れ角/縦揺れ角)を図-10にそれぞれ風速、周期との関係で図示した。この結果、風単独では横揺れが現れていること、また波浪単独では全振幅比が0.1以下であること、さらに定常風あるいは変動風と規則波同時作用時は風速10m/sを除くと波浪と同様全振幅比が概ね0.1以下であることがわかる。

(6) 変動風と規則波に対する時刻歴解析結果

ここでは、実際に測定した風速記録を風荷重時系列に変換し、規則波と風荷重時作用時における傾斜応答を解析し測定結果と比較した。波力係数としては $C_d=0.8$ 、 $C_m=1.3$ としたが、(3)や(4)で述べた結果を踏まえ決定した。解析から得られる波形は、平均傾斜位置を2度ほどずらしてある実際に測定した波形と良く合う。ただし、変動風速7.0m/s、波高7cmとする。

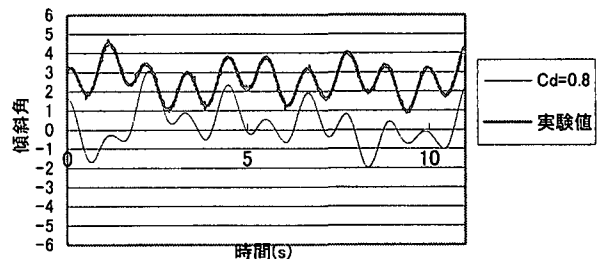


図-11 解析値と実験値の比較(周期1.1s)

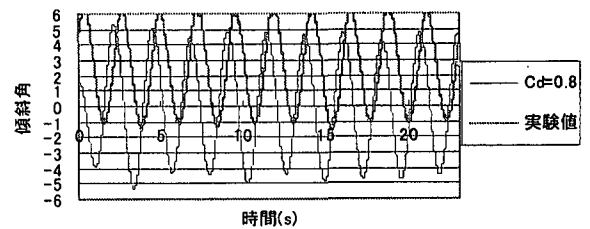


図-12 解析値と実験値の比較(周期2.3s)

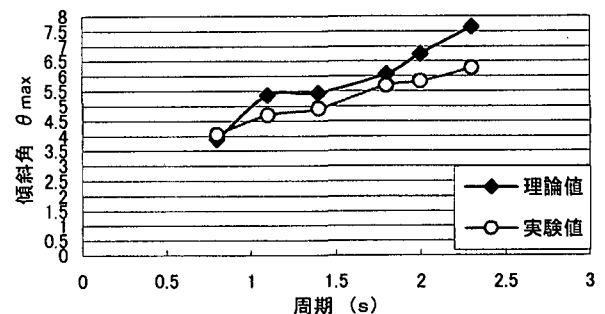


図-13 理論値と実験値の比較

5. 結論及び考察

(1) スペクトル解析

風洞は定常風しか発生できない装置であったので、自製の布を使った乱れ発生装置で、乱流を発生させたところ、Ochi (1988) の提唱する海上風のスペクトルと類似の形状を有するスペクトルを得ることができた。風と波浪同時作用下での傾斜運動の周波数特性は、固有周期に対応する0.3Hz付近で最大のスペクトル密度となり、1.0 (1s) ~20Hz (0.05s) の周波数範囲ではほぼ一定で、波浪の周波数のところでやや大きくなる傾向をもった特性である。

(2) 抗力係数

今回のタワーのような円柱の抗力係数は一般に0.7~0.8位であるが、実験では定常風も変動風も共にCd値に開きがある。ただ定常風の変化幅は小さく、風速6m/s以降あまり変化はない。逆に変動風は変化幅が大きい、風速8m/s以降にはCd値に変化は見られない。このため、定常風では0.8位の安定したCd値をとる。変動風では最終的には1.00位でCd値は安定するとみられるが、これは風速がかなり強い場合の時であり、Cd値は風速に大きく左右されるため大きな値をとることが考えられる。

一般に自然界では、変動風のような乱れのある風が発生し、実験結果のようにCd値には広がりがあるためタワーに作用する風荷重はガストファクターを考慮し算定するか、直接変動風を用いて時刻歴荷重として算定する必要がある。乱れによるガストファクターとしては、約1.4程度の効果を考慮する必要がある。ガストファクターを考慮する場合は定常風のCd値を用いることができない。

(3) 波浪に対する応答

縦揺れ角の実験値と理論値は周期が短い1秒以下では値が合わない。これは水槽の性能(長さが短い)のため、短周期では側壁を含めた反射波の影響が入り安定した波が発生できなかったためである。長周期になると、実験値と解析値は良く一致し、抗力係数は0.8~1.0の範囲にある。全体としては、抗力係数0.9、慣性力係数1.3とすれば良いと思われる。

(4) 波浪および風に対する応答

実験値が理論値より大きいのは、それぞれ単独作用時の風と波を理論的に重ね合わせただけよりも、実際は風と波が複雑に作用するため、理論値よりも条件は複雑かつ厳しくなるので、理論値よりも変化が大きい。変動風+規則波が理論値に近いのは、乱れの構造によって決まるガストファクター(突風率)の値を実験値に近づくように定めたことにより生じた。今回の実験では、風速を4m/s, 7m/s, 10m/sでの比較をしたが、これらの風速は実

際にタワーに作用する風速に直すとかなり強い風速であり、また周期も実際に東京湾などで発生するのは3~5秒位が平均で、今回の実験でこの範囲内の傾斜角は最大で約6.00°、最小で約2.00°であった。このため、これ以上の風速、周期が作用すれば傾斜角も大きくなり、タワーの負荷に大きく影響する。

(5) 縦揺れ角と横揺れ角の時刻歴

定常風と変動風の風による横振動は、カルマン渦による揚力の影響と思われる。また、波浪場では横振動がほとんど発生しないことは、波浪場ではカルマン渦による揚力が発生しにくいことに起因する。風と波浪場では風荷重による振動が卓越するため風の影響が現れることがわかる。

(6) 変動風と規則波に対する時刻歴解析結果

周期が長くなる程、理論値と実験値の値は近づいていくことが分かる。これは、うねりが発生するためだと思われる。周期が短いと理論値と実験値が合わないのは、波が定常になる前に反射波が入ってしまい、その状態でサンプリングしてしまっているためと思われる。

(7) 結論

上記実験および解析結果を踏まえ、主要な結論として以下のことがあげられる。

- 1) 風荷重算定にあたっては、抗力係数を0.6とし、さらに変動風として取り扱うためには、ガストファクター1.4程度を考慮する必要がある。
- 2) 渦による横振動は風単独の場合は発生するが、同時に作用する風と波浪に対してはそう大きくないと思われる。
- 3) 風と平行な縦揺れ運動は慣性力係数1.3(中間部1.4)、抗力係数0.9とすると、精度よく応答が推定できる。

参考文献

- 1) K. Sekita : Model test on Guyed Towers the Focus on their Nonlinear Characteristics, Proc. of the 5th international OFFshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium, Vol. III, ASME, pp.186-193, 1986.
- 2) 関田欣治・鈴木智也・野本由紀夫・谷口直之: 上下スライド可能な浮力タワーの波力応答に関する解析, 海洋開発論文集, Vol. 17, pp.187-192, 2001.