

潮流・不規則波浪を受ける 構造物の非線形振動解析

A Nonlinear Vibration Analysis of Marine Structures
Subjected to Tidal Current and Stochastic Waves

渡邊英一*・阿部雅文**・松本敏克***・酒井哲郎****・杉浦邦征*****

By Eiichi WATANABE, Masafumi ABE, Toshikatsu MATSUMOTO
Tetsuo SAKAI, and Kunitomo SUGIURA

Presented herein is a simulation analysis on the dynamic response of two-dimensional ocean platforms subjected to tidal current and random wave forces. The wave forces on the platforms are evaluated by the Morison's equation taking into account the nonlinear drag forces. The waves are assumed to follow the Pierson-Moskowitz spectrum and the random phase angle. The emphasis is placed on the investigation on the effect of the tidal current besides the ordinary wave forces. Through the analysis, it is found firstly, that the response under the nonlinear drag forces still shows the properties of the Gauss process; secondly, the effect of the tidal current becomes significant when the wind velocity is large.

1. はじめに

比較的水深が小さい沿岸周辺から沖合いにかけては、複雑な海岸線と様々な気象条件が重なりあい、構造物にとって厳しい環境となる。特に波浪、風などの外力は不規則であり変動も大きく、また潮流などは局所的な地形に大きく左右される。このように構造物にとっては厳しい条件となり得る状況にもかかわらず、その状況下での構造物の動的挙動に関しては、まだ充分には分かっていない。

今までの海洋構造物に関する研究は、波と構造物との相互作用を考慮の有無、また、確定論的にとらえるのか、あるいは確率過程としてとらえ不規則振動論を用いるかによって大きく分けられる。これまで、構造物と波の相互作用を考慮し、さらに不規則振動論を用いた論文はあるが、これらは相互作用による運動方程式の非線形項を等価線形化することにより解いている。^{1),2)} この方法は波のエネルギーが小さいときは適当な方法と考えられるが、エネルギーが大きい場合には正解から大きくずれる可能性がある。³⁾ また潮流や吹送流などの流れがある場合には使えない。そこで、本論文では、波浪をシュミレーションし、運動方程式を経時的に各ステップ毎に解いて構造物の応答を求めた。このとき、流れの影響も考慮して、従来から行われている有義波を用いた解析とも比較し、有義波を考えることの意義を検討した。

* 正員 Ph. D., 工博 京都大学教授 土木工学科; **正員 工修 富山県庁

*** 学生員 京都大学大学院工学研究科 修士課程; ****正員 工博 京都大学助教授 土木工学科

***** 正員 Ph. D., 京都大学助手 土木工学科

2. 外力のモデル化

2.1 波のスペクトルと有義波

実際の波浪は時間的にも空間的にも不規則であり、それを一般的な形で表すのは難しい。しかし、波の発生域に比べて小さな範囲における比較的短時間の波の特性は、確率過程の理論を用いて一般的に表現することができる。ここでは周波数特性に注目し、そのスペクトルの一例として Pierson-Moskowitz のスペクトルを用いる。Pierson と Moskowitz は、十分発達した外洋における波のスペクトル密度が適当な無次元化によって同じ形状になるという Kitaigorodskii の仮説をもとに、波の実測データから図-1 にあるような波のスペクトルを提案した。これは片側スペクトルであり、つぎのような式で表すことができる。⁴⁾

$$S_{\eta}(\omega) = \frac{\alpha}{\omega^5} \exp\left(-\beta \frac{g^4}{U^4 \omega^4}\right) \quad (1)$$

ここに、 ω : 波浪の角周波数

g : 重力加速度

U : 海面上 19.5m における風速

$\alpha = 8.1 \times 10^{-3}$

$\beta = 0.74$

このスペクトルは ω_p において最大値をとる。

$$\omega_p = \left(\frac{4}{5} \beta\right)^{1/4} \frac{g}{U} \quad (2)$$

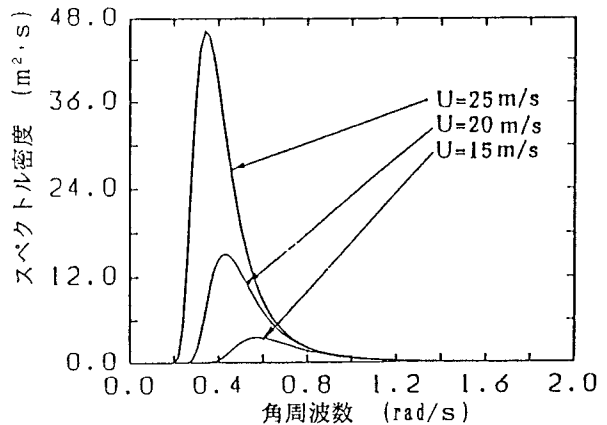


図-1 Pierson-Moskowitz のスペクトル

ところで、波についての不規則性を表すのに有義波・最大波という概念がある。これはある波浪状況を表すために用いられた仮想的な波であり、その波高 $H_{1/3}$ は波群中の各波の中で波高の大きい方から数えて全波数の $1/3$ の数の波について波高を平均した値、その周期は有義波高の算出に用いられた波の周期を平均した値であり $T_{1/3}$ で表される。また、最大波とは、各波の中での最大の波高の波をさし、その波高を H_{max} 、その波の周期を T_{max} で表している。ここで、有義波と Pierson-Moskowitz のスペクトルとの関係を示しておく。 $S_{\eta}(\omega)$ の n 次のモーメント m_n を用いて有義波高 $H_{1/3}$ および平均周期 T は次のように表される。^{5), 6)}

$$H_{1/3} = 4 m_0^{1/2} = 2.14 \times 10^{-2} U^2 \quad (\text{m} \cdot \text{s 単位}) \quad (3)$$

$$T = 2 \pi (m_0 / m_2)^{1/2} = 0.52 U \quad (\text{m} \cdot \text{s 単位}) \quad (4)$$

$$T_{1/3} = 1.1 T \quad (5)$$

$$m_n = \int_0^{\infty} \omega^n S_{\eta}(\omega) d\omega \quad (6)$$

港湾・海岸構造物の設計においては、不規則な波を有義波、最大波などであらわし、不規則波の作用を近似的に解析する方法が行われている。しかし構造物の固有周期の関係上、特定の周期帯の波が大きな影響を及ぼすと考えられるため、その適用には注意を要する。

2. 2 波浪のシミュレーション⁷⁾

Pierson-Moskowitzのスペクトルをもとに、不規則波の波形をシミュレートする。フーリエ展開により、不規則波形 $\eta(x, t)$ を ω_n を角周波数にもつような N 個の成分波の和として、つぎのように表す。

$$\eta(x, t) = \sum_{n=1}^N a_n \sin(\omega_n t - k_n x - \varepsilon_n) \quad (7)$$

ここに、 k_n は波数で $\omega_n^2 = g k_n \tanh k_n h$ なる関係を満たし、 h は水深である。また ε_n は $-\pi \sim \pi$ に一様確率でランダムに分布する位相角を表している。そして a_n はつぎのようにして与えられる。 $\eta(t)$ のパワースペクトル密度 $S_\eta(\omega)$ の ω 領域において、上限値 ω_{N+1} と下限値 ω_1 との間を N 等分し、

$$a_n = \sqrt{2 \int_0^\infty S_\eta(\omega) d\omega} \quad (8)$$

$$\text{ただし、} \quad \Delta \omega = (\omega_{N+1} - \omega_1) / N, \quad \omega_n = \omega_1 + (n-1) \Delta \omega \quad ; n=1, 2, \dots, N+1$$

で与えられる。また、式(7)は N が充分大きい場合にガウス性が保証され、簡単な計算により定常確率過程と、エルゴード性の条件が満たされることが確かめられるので、スペクトル解析が可能である。ここでは、 $N=50$ とし、各周波数帯の中央を代表周波数に選んだ。またモンテカルロ法により位相差に対して乱数を発生させ、疑似波浪をシミュレートしている。

2. 3 流れの性質

これまでの研究では潮流などの流れはあまり考慮されていなかった。そこで本研究では、簡単ではあるが流れによる影響について考えてみたい。海岸より少し離れた地点の流れは、潮流のほかにも風が水面を引きずることによって生じる吹送流などがある。潮流は、比較的海岸付近で見いだされ、潮汐という長波によって生じる流れであるから、その水深方向の流速分布は波浪と異なりほとんど一様で、流速が底部付近においてわずかに低減するような分布を示す。一方、荒天下において、海岸線から遠く離れた海域では潮流は一般に小さいが吹送流が生じる。これらの流れの正確な流速分布を理論的に求めるのは難しく、鋼構造物設計指針⁸⁾では、流れの水深方向の変化は実測によって求めることが望ましいとしているが、簡易的には式(9)のような算定式を用いてもよいとしている。そこで、ここでは式(9)に示される時間的に一定な流れを考えることにする。

$$V_z = V_s (z/h)^{1/7} \quad (9)$$

z : 海底面からの高さ

h : 水深

V_z : z における流速

V_s : 海表面における流速

2. 4 波力の算定

海洋構造物に作用する波力は、構造物の種類、形状あるいは地形などによって異なるが、本研究では円柱

部材を用いた構造物を考えており、波力のうちでも不規則な波浪状態における慣性力、流れを考慮した抗力を考える。ここでは特に構造物と流体との相互作用を考慮するために、つぎに示す修正 Morison式を用いる。これは水深方向にとらえた円柱の微小部分dzに作用する流体力dFを表している。

$$dF = \{ (C_M - 1) \frac{\pi D^2}{4} \rho (\ddot{u}_n - \ddot{x}_n) + \frac{\pi D^2}{4} \rho u_n + \frac{C_D}{2} \rho D (u_n + v_n - \dot{x}_n) |u_n + v_n - \dot{x}_n| \} dz \tag{10}$$

ここに、 u_n ：水粒子速度、 x_n ：構造物の変位、 v_n ：流体の流れの速度、 D ：管径、
 ρ ：流体の密度、 C_M ：慣性力係数、 C_D ：抗力係数、 z ：海底面からの座標。
ただし「 $\cdot$ 」は時間に関する微分を表す。

第1, 2項は慣性力項と呼ばれ、それぞれ、相対および絶対水粒子加速度 u_n に比例している。そのうち前者は、速度が局所的に加速や減速されるために生ずる力であり、後者は圧力勾配による力である。第3項は水粒子の相対速度 u_n の2乗に比例し、抗力項と呼ばれる。またこの式では u_n に一樣な流体場での水粒子速度を用いざるを得ないので、構造物の管径が波長に比して充分に小さいという仮定のもとにはじめてこの式は適用可能である。しかし、この場合も流体の乱れを厳密には考慮することができず、部材相互の影響も考慮できない。この u_n と式(7)で表される $\eta(t)$ の間には、それぞれの成分波に対して式(11)に示す関係が成り立つ。なお、この式は微小振幅波理論にもとづくものである。

$$u_n = \frac{a_n}{2} \frac{\omega_n}{\omega_n} \frac{\cosh kz}{\sinh kh} \sin(\omega_n t - k_n x - \varepsilon_n) \qquad \text{ただし、} \bar{\omega}_n = \frac{\omega_{n+1} + \omega_n}{2} \tag{11}$$

慣性力係数 C_M には、ポテンシャル理論によって求められた値である、2.0を採用する。また抗力係数 C_D は物体の形状、Reynolds数、表面の状態などによって変化するが、流速計算の精度や海中における表面粗度の増加の可能性を考慮して、1.0を採用する。

ここでは流れの影響も考えているので、 v_n が抗力項中に含まれるが、この v_n の時間的な変化は非常に小さいと考えられるので、慣性力項中の v_n は無視できるものと仮定している。

この式からわかるように外力項は非線形となるので、解析上、大きな問題になる。それで、抗力項を水粒子速度と構造物の速度について線形化する方法が考えられてきた。この方法は、抗力項が慣性力項に比べて小さい場合には、正解に近い結果が得られる。図- 2を参照すると、これは水深・波長比 (h/L) の変化にか

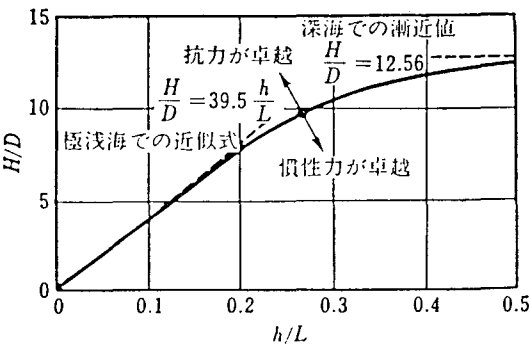


図- 2 抗力および慣性力の卓越領域⁵⁾

かわらず、波高・管径比 (H/D) が小さい領域であり、波高 H が小さいときに対応している。つまりこれは風速 U が小さい場合ということになる。ところが、設計を行う際に問題となる強風時には、線形化のために生ずる誤差が大きくなり、応答が危険側に出ることが考えられる。このようなことから、抗力項を線形化することなしに時刻歴応答解析を用いて非線形である運動方程式をそのまま解くことにする。

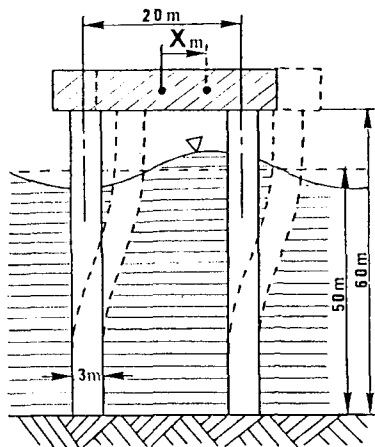
3. 時刻歴応答解析

3. 1 時刻歴応答解析の方法の選択⁹⁾

振動を解析する方法はいろいろあるが、基本的には現在の変位、速度、加速度から Δt 時間後の変位、速度、加速度を求めようとするものである。本研究の場合、外力項は非線形になるが、この非線形項を等価線形化しないために Δt 後の各々の値を求める際に反復法を用いることにする。しかしながら、ここで、反復法の収束性が問題となる。これには、 Δt を固有周期の 0.4 倍以下にとらないと収束しないという結果が得られている⁹⁾。例えば、モードの中に縦振動が含まれる場合になると、 Δt を非常に小さくとらなければならなくなり、波の周期が15秒やそれ以上のものを解析しようとするには、あまりにも非効率になり、多自由度の場合は、もはや反復法が使えない状態になってしまうことになる。

そこで、ここでは簡単のために自由度を横振動のみの1とし、反復法を用いて非線形振動を正確に解析する。その際、 Δt の大きさと解析すべき時間の関係から、Willsonの θ 法を用いて $\theta=1.4$ とした。

3. 2 解析モデル



図－3 解析モデル

管径	3m	水深	50m
レグ長	60m	板厚(レグ部)	4cm
スパン長	20m	デッキ重量	600 t

表－1 諸元の値

	変位 (cm)	加速度 (gal)
1自由度	2.36	10.9
30自由度	3.01	10.0

表－2 1自由度モデルと30自由度モデルの比較(標準偏差)

ここでは、図－3のような基本的なモデルを考えた。2本のレグを有する2次元ラーメン構造で、簡単のため平坦な海底地盤に剛結されているとする。部材は鋼製円筒状のレグを用い、デッキは剛体とした。これは、水平変位のみを許した1自由度振動を対象としている。ただしこの基本モデルの場合、1次モードの影響は支配的であり、有限要素法により1自由度および30自由度で解析した結果の差は、表－2に示すようにそれほど大きくはない。

解析時間は 400秒で $\Delta t=0.1$ としたがそのうち後半の 300秒をデータに活用した。また各時間ステップごとに収束計算を行っているが、デッキの加速度が 0.1gal のオーダーまで一致するまで計算を行った。さらにここでは、波力を正確に計算することが重要となるので、変位関数には 3 次の Hermite 多項式を用い、数値積分にはガウスの 10 点積分法を用いた。構造物の減衰定数は 0.05 としたがそれ以外の諸元の値は図-2、および表-1 を参照されたい。

4. 解析結果および考察

4. 1 線形外力による予備的考察¹⁰⁾

まず手始めに、風速 U が 15m/s で、流れがなく、波力として慣性力のみが作用する場合の基本モデルについて考えてみる。この場合には外力は線形になる。ちなみに、このときの有義波高 $H_{1/3}$ および有義波周期 $T_{1/3}$ は、式(3)～式(6)より、 $H_{1/3}=4.82\text{m}$ 、 $T_{1/3}=8.58\text{s}$ となるので、微小振幅波理論にしたがえば、 $H/D=1.61$ 、 $h/L=0.44$ と求められる。図-2を参照すると、この場合は慣性力が大きく卓越していることが分かる。ただしここでは、外力のうち波浪と流れによる力のみを考えているので、水面上方にある構造物に加わる風荷重は無視している。

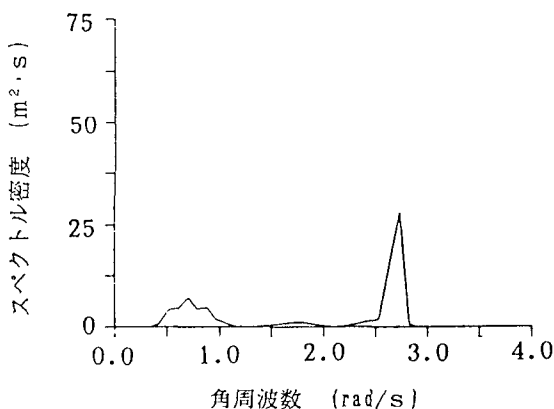


図-4 デッキ変位のパワースペクトル密度

図-4 はデッキの水平変位の応答のパワースペクトルを表している。これを見る限り、図-1 の入力のパワースペクトルとかなり形が違っている。図-1 には、角振動数 $\omega=0.6$ 付近でピークが一つ存在するだけであるが、図-3 では、 $\omega=0.6, 1.75, 2.7\text{ rad/s}$ 付近でピークがある。 $\omega=0.6\text{ rad/s}$ のピークは水位変動のそれと一致するものであり、 $\omega=2.7\text{ rad/s}$ のピークは構造物の固有振動数に対応するものである。ではつぎに、 $\omega=1.75\text{ rad/s}$ のピークについて考えてみる。

N 本のレグをもつ構造物に加わる全体の波力は一般に次式で表される。

$$\sum_{i=1}^N F(\omega) \sin \{ \omega t - \varepsilon - (i-1)kL \} \quad (12)$$

ここで L は、レグ間隔(スパン長)である。これを次のように式を変形する。¹¹⁾

$$F(\omega)T(\omega)\sin\left\{\omega t-\varepsilon-\frac{(N-1)}{2}kL\right\} \quad \text{ただし、} T(\omega)=\frac{\sin(NkL/2)}{\sin(kL/2)} \quad (13)$$

この式で $T(\omega)$ は、レグの本数、レグ間隔と波長の関係を表す関数と考えることができる。これを用いると最終的に変位と加速度のパワースペクトル S_δ 、 S_a は、次のように表せる。

$$S_\delta(\omega)=\{\delta(\omega)T(\omega)F(\omega)\}^2 S_\eta(\omega) \quad (14)$$

$$S_a(\omega)=\{a(\omega)T(\omega)F(\omega)\}^2 S_\eta(\omega) \quad (15)$$

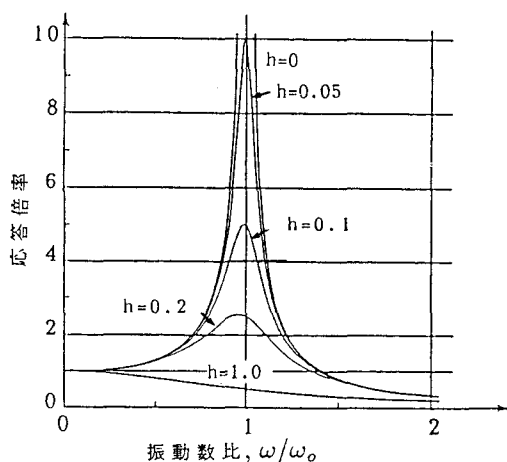


図-5 (a) 変位伝達関数

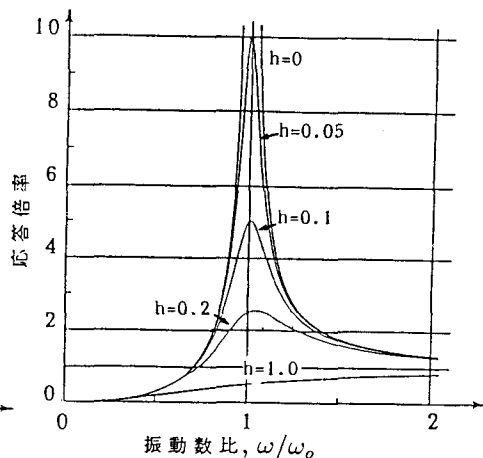


図-5 (b) 加速度伝達関数

ここで $\delta(\omega)$ 、 $a(\omega)$ は変位、加速度の伝達関数であり、それぞれ、図-5 (a)、(b)のような形をしている。¹²⁾ この $T(\omega)$ を用いて $N=2$ の場合の構造物と波浪とのスケールについて考えてみると、角振動数 ω が 1.75 rad/s の波というのは、スパンと波長の比が1となっていることがわかった。すなわち、2本柱に加わる波力の位相差が 2π であり互いに強め合うことを意味する。したがってこの角振動数でピークが現れるのも当然のことと考えられる。また $\omega=1.25, 2.15 \text{ rad/s}$ の波は、スパンと波長の比がそれぞれ $0.5, 1.5$ に当たり、このときの波力の位相差は $\pi, 3\pi$ で、互いに弱め合うことになる。¹³⁾ その様子が図-4からもうかがえる。

次に応答の線形性について調べる。入力線形でガウス性を持つ場合は応答もガウス性を持つので、例えば変位のパワースペクトルを $S_\delta(\omega)$ とすると、変位が単位時間内にレベル $+a$ および $-a$ を、それぞれ正の勾配と負の勾配で横切る回数の和は、式(16)で表すことができる。

$$\nu_a = \frac{1}{\pi} \left(\frac{m_2}{m_0} \right)^{1/2} \exp \left(-\frac{a^2}{2m_0} \right) \quad \text{ただし、} \quad m_n = \int_0^\infty \omega^n S_\delta(\omega) d\omega \quad (16)$$

ここではこれを頻度と呼ぶものとする。特に、 $a=0$ のときは構造物の平均振動数の2倍を与える。¹⁴⁾ ここで、これは応答のガウス性を仮定した式であるから、もし、実際の応答が式(16)で示された値と一致すれば、応答のガウス性が保証される。そこで、この式(16)と実際に得られたデータから直接求められた頻度を比較したのが図-6である。ここではレベル a として、水平変位の絶対値をその標準偏差で無次元化

した値を用いている。ただしこの水平変位は平衡位置（振動の中心）からの変位置として定義している。この場合は慣性力のみが作用するので運動方程式は線形であり、応答もガウス性が保証されている。したがって両者はほとんど一致している。しかし、抗力が加わり運動方程式が非線形になると一致なくなる可能性もある。以上の事情を考慮にいれて外力に抗力を加味した場合の解析結果について考察する。

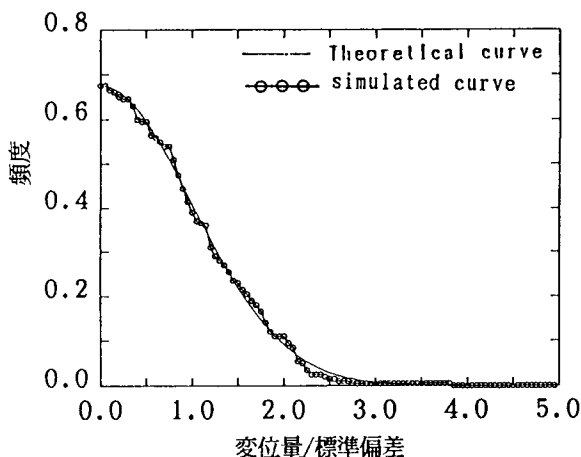


図-6 ガウス性をもつ理論曲線と実現値の比較-1

4. 2 非線形項を考慮した外力による応答特性

図-7, 8 は風速 U が 15m/s と 25m/s の場合のデッキの水平変位と加速度のパワースペクトル密度を示している。ただし、いずれも流速 V_n は 0m/s としている。変位が波浪スペクトルの低周波部分の影響を強く受けているのに対し、加速度は共振部分の影響を強く受けているということがわかる。これは、図-5 (a), (b) を見れば容易に見当がつく。すなわち、共振点よりも低周波側の伝達関数は、変位の場合は 1 より大きく、加速度の場合は 0 に近いからである。また図-4 と比べると共振部分がかなり小さくなっている。これは、抗力が非線形であることによる減衰効果と考えられ、加速度についても同様なことが確かめられた。

つぎに U が 25m/s に増加すると低周波数側で波浪のエネルギーが増大するので、例えば変位のパワースペ

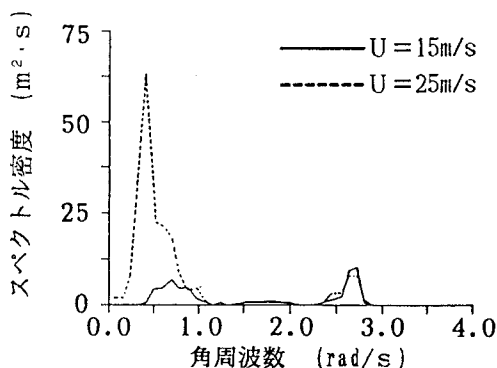


図-7 デッキ変位のパワースペクトル密度

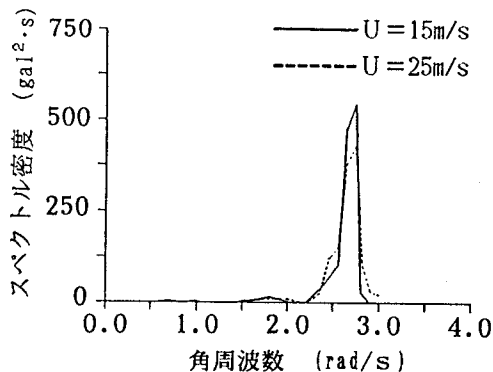


図-8 デッキ加速度のパワースペクトル密度

クトルを見ると、図-7のようにピークが $U=15\text{m/s}$ の場合に比べて約10倍となっている。ところが、 $U=25\text{m/s}$ では、卓越したスペクトル成分がより低周波側にずれていることが、式(2) および図-1より明かである。外力の卓越振動数が構造物の固有振動数より遠ざかるにもかかわらず、応答が大きく現れているのは、卓越した外力の低周波成分が非常に大きいことを示している。それに比べ、共振部分は、さらに相対的に小さくなっている。また線形計算でみられた、角周波数 $\omega=1.75\text{ rad/s}$ 付近のピークも $U=25\text{m/s}$ ではかなり小さくなっている。ところが式(1)によると、風速が大きくなれば、パワースペクトル密度は全周波数帯で増大する。にもかかわらず、高周波側での応答の極大部が低下傾向にあるのは、外力の非線形効果(抗力の影響)が大きく現れているように思われる。これについては4. 4で再度考えることにする。

4. 3 流れがある場合のシミュレーション

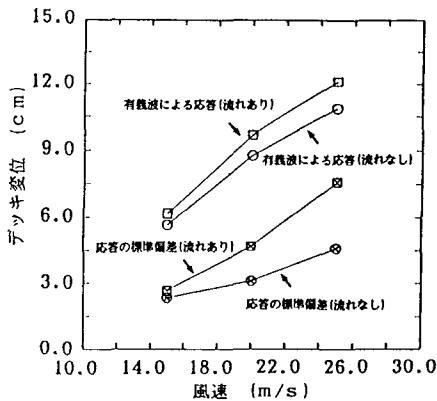


図-9 有義波による応答の最大値と

P. Mスペクトルによる応答の標準偏差

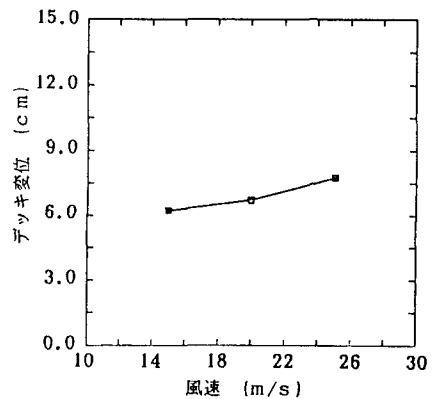


図-10 流れのある場合の平衡位置

図-9は、横軸に風速をパラメータにとり、縦軸には有義波の応答と Pierson-Moskowitzのスペクトルにしたがう波浪の応答を、それぞれ流れがない場合とある場合について示したものである。ただし有義波はこのスペクトルをもとに式(3)～(6)を用いて求めてある。ただし、ここでは流れの効果を次のように評価した。有義波を用いた解析では、設計上、便宜的に波高を10%増すことによりその効果を表していることから¹⁵⁾、この方法にしたがった。また、スペクトルによる解析では、式(9)で海表面における流速 V_s が 3m/s となる流速分布を用いた。この値は流速としては大きなものであり、構造物には厳しい条件になると考えられる。また各応答は、前者をデッキの水平変位の最大値、後者をデッキ変位の標準偏差で表している。標準偏差を用いた理由は、有義波による応答が単一の正弦曲線となるので最大値を求めれば特性が把握できるのに対し、スペクトルを入力した場合の応答では不規則な振動全体の特性を表す必要があるからである。ここでも変位は平衡位置からの変位量として定義しているので注意していただきたい。

風速が増大したとき、有義波による解析では、流れのない場合に対して流れのある場合は、各風速とも一定レベルで応答が増加しているが、スペクトルによる解析では風速が増すにつれて標準偏差の差は大きくなっている。ところで、平衡位置について考察すると、有義波による解析では、流れの有無によらず平衡位置は0である。これは有義波高を10%増すだけで、外力は正弦波には代わりがないからである。スペクトルによる解析でも、流れのない場合の平衡位置はほぼ0であることが確認された。これはつぎの4. 4で考察するガウス性の成立と関連するところである。ところが流れがある場合の平衡位置は、流れのない場合に比べかなりずれる。その様子を図-10に示す。

4. 4 応答におけるガウス性

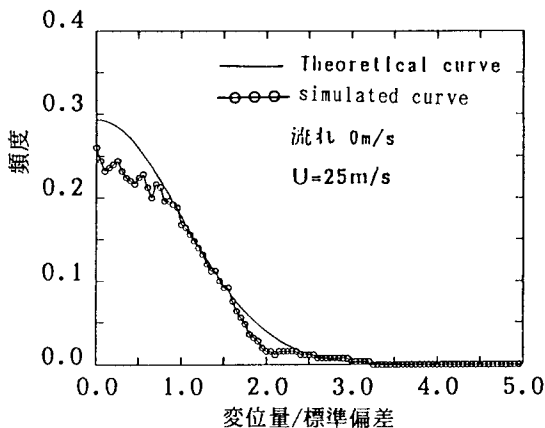


図-11 ガウス性をもつ理論曲線と実現値の比較-2

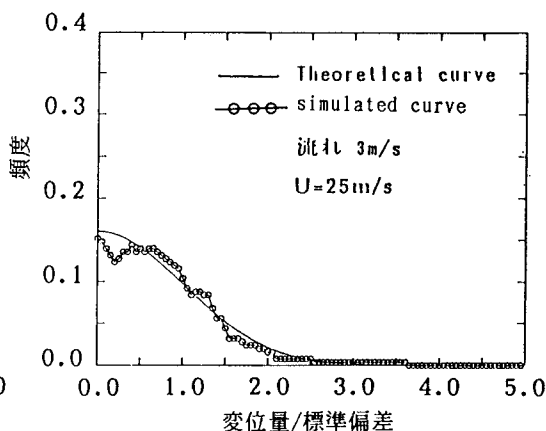


図-12 ガウス性をもつ理論曲線と実現値の比較-3

さて、波力として慣性力のみを考えた場合、図-6のように応答のガウス性を示すことができたが、抗力が加わった場合については、デッキの平衡位置からの水平変位が一定レベルを越える頻度は、図-11, 12のような結果になった。これらはともに風速 U が 25m/s で、それぞれ、流れがない場合とある場合について示してある。慣性力のみの場合に比べて、ガウス性を仮定した理論曲線と多少のずれはあるものの、流れがある場合でも、理論曲線から大きくそれることはない。とりわけ $U=15\text{m/s}$ の場合には、理論曲線とのずれが比較的小さいことが確かめられた。ちなみに、 $U=25\text{m/s}$ の場合の有義波高 $H_{1/3}$ と有義波周期 $T_{1/3}$ は、 $H_{1/3}=13.4\text{m}$ 、 $T_{1/3}=14.3\text{s}$ であり、 $H/D=4.46$ 、 $h/L=0.19$ となる。図-2では、一応、慣性力が卓越する領域に含まれるものの、抗力は比較的大きいと考えられる。たしかに、4. 2では共振部分の影響が相対的に低下するというように非線形の効果も現れている。しかし、図-11, 12によれば、この程度の非線形性があっても、応答にガウス性が認められると考えても良いのではないだろうか。

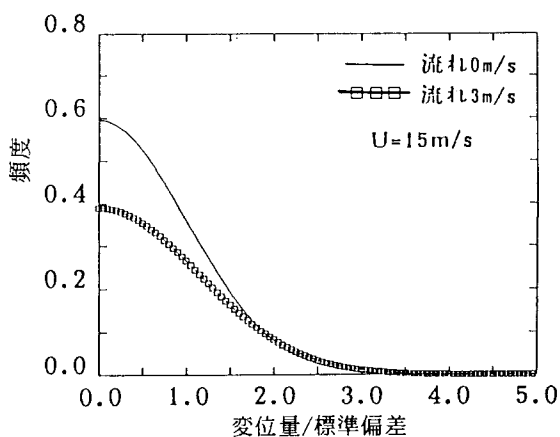


図-13 流れの有無による変位特性の違い-1

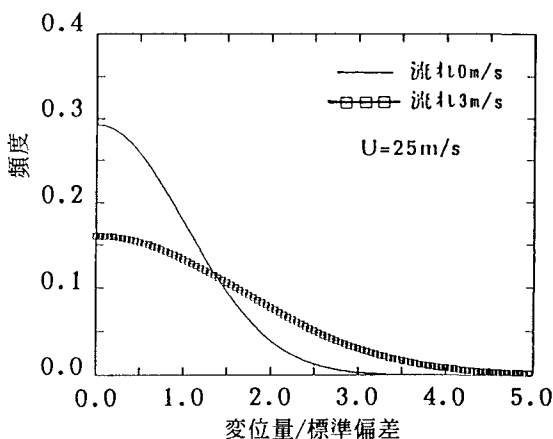


図-14 流れの有無による変位特性の違い-2

そこで、この応答がガウス性を満足するものと仮定して、風速 U が 15m/s、25m/s について流れがそれぞれ 0m/s、3m/s の理論曲線を示したのが 図-13,14 である。なお、図-6,11,12 の横軸とは無次元化の仕方が異なり、流れがない場合の標準偏差で平衡位置からの変位量を無次元化してある。まず、レベル0における頻度に注目すると、流れの有無によらず $U=15\text{m/s}$ よりも、 $U=25\text{m/s}$ の方が頻度は小さくなっている。つまり、構造物の平均振動数が低下することを意味しており、デッキはゆっくり揺れる。風速 U が大きくなればスペクトルのピークは低周波側にずれることから、これもまた、外力の卓越した低周波成分の効果を示すものと考えてもよい。また風速によらず、流れがある方の頻度も同様に低下していることも注目に値する。次にレベルが2～3以上の高域に着目すると、風速により程度の差はあれ、流れのある方が、流れの無いときよりも頻度は大きくなる傾向にある。したがって、強風時と同じく流れのあるときもデッキは大きくゆっくりと揺れることになる。つまり、流れは構造物の低周波側の応答に大きな影響を与えると考えられる。ただし、その程度は $U=25\text{m/s}$ の方が大きいことから、これはまた、波浪と流れの相互の影響によりもたらされた効果と考えることもできる。また、図-14を見る限りでは、明らかに、頻度の標準偏差は、流れのない場合よりもある場合の方が大きい。水平変位の標準偏差と頻度の標準偏差の間に、かなりの相関があるものとすれば、これは図-9の傾向に一致するものである。すなわち、図-14の場合では頻度の流れの有無による標準偏差の差が大きいのに対し、図-13ではその差は小さくなっている。

5. 結 論

最後に、この研究で明らかになったことを箇条書にまとめる。

- 1) 慣性力の場合に比べて、運動方程式に非線形である抗力を加えると、減衰効果を生じ、共振部分の影響が相対的に低下する。
- 2) 風速が増大すると抗力の影響も大きくなるが、それにともない減衰効果も大きくなる。とくにこれは、外力の卓越振動数を越えた高周波側の応答に与える影響が大きい。
- 3) 風速が増すにつれて低周波側での応答が大きくなるが、これは振動特性により応答が小さくなる効果以上に、卓越した外力の低周波成分が非常に大きく影響するからである。流れがある場合には応答はさらに大きくなるが、その増加の仕方は一定ではなく強風になるほど大きい。
- 4) 流れがある場合は、構造物の低周波側の応答に対する影響が大きく、流れのない場合に比べ、不規則な振動をする構造物の平均振動数は低下するが、応答は大きくなる可能性が高い。この傾向は強風になるほど顕著である。
- 5) 抗力を考えた場合でも、かなりのガウス性を認めることができるので、ガウス過程にもとづいた確率的な取扱ができる。
- 6) 有義波を用いた解析では、波浪と流れの複合された効果を正確に把握するには限界があり、特に強風時における海洋構造物の設計には注意が必要である。

6. 参 考 文 献

- 1) E.T.Foster, Jr. : Model for Nonlinear Dynamics of Offshore Towers EM Division Proc. ASCE, pp. 41-67, Feb., 1970.
- 2) A.K.Malhotra and J.Penzien : Stochastic Analysis of Offshore Tower Structures, Report No. EERC 69-6, University of California, May, 1969.
- 3) V.V.Bolotin 著 小林繁夫他共訳 : 構造設計の確率論的方法と信頼性問題, 培風館, 1981年.
- 4) W.J.Pierson, Jr. and L.A.Moskowitz : A proposed Spectral Form for Fully Developed Wind Seas Based on the Similarity Theory of S.A.Kitaigorodskii, Journal of Geophysical Research, Vol.69, No.24, pp 5181-5190, 1964.
- 5) 岩垣雄一, 榎木享共著 : 大学講座, 土木工学25, 海岸工学, 共立出版, 1979年.
- 6) Cartwright, D.E. and Longuet-Higgins, M.S. : The Statistical Distribution of the Maxima of random Function. Proc. Royal society, A237, 1956.
- 7) 星谷勝著 : 確率論手法による振動解析, 鹿島出版会, 1974年.
- 8) 土木学会編 : 鋼構造物設計指針 PART 3 海洋構造物, 1987年.
- 9) 戸川隼人著 : 有限要素法による振動解析, サイエンス社, 1975年.
- 10) 伊藤喜行, 谷本勝利, 小舟浩治 : 柱状構造物の波力応答計算, 港湾技術研究所報告, 1972年9月.
- 11) 森口繁一, 宇田川埴久, 一松信著 : 岩波数学公式Ⅱ, 岩波書店, 1957年.
- 12) 片山恒夫, 国井隆弘, 宮田利雄著 : 新体系土木工学10 構造物の振動解析, 技報堂出版, 1979年.
- 13) 渡邊英一他 : 大型海洋構造物の波浪動揺解析, 構造工学論文集Vol.35A, 1989年3月.
- 14) 柴田明德著 : 最新耐震構造解析, 森北出版, 1981年.
- 15) W.J.Graff : Introduction to Offshore structures, Gulf Publishing Company, 1981.

1989年 10月 2日