

風と波の作用を同時に受ける海洋構造物の基礎実験

椎 貝 博 美*・張 換 樞**

1. 序 論

近來海洋構造物の数の増大に伴い、波力に関する研究は多く行なわれている。もともと海洋構造物は波に対して安全であるように設計されているので振動についてはかなり立ち入った考慮がされているのが普通である。

一方海上の構造物自体に対する風力の影響はあまり詳しく調べられていないようである。これは主として次のような理由によるものであろう。まず、前述のように海洋構造物は一般に振動に対する考慮がなされており、そのために陸上の構造物のように振動に対して意外なものを示す恐れはまずないと考えられることがあげられる。次に波力は一般に風力に比較して大きく、波力に対して設計しておけば通常は安全であると考えられるからであらう。

しかし、構造物の周波数応答を考えると、いかに風力と波力の比が小さくても一応は考えておいた方がよい事項であるとも考えられるし、風力に対する露出面積などもどのように考えておけばよいか、ということも興味ある問題であらう。さらに対象をうんと小さくして、たとえば海流の方向を浮標などによって知ろうという場合、風の影響をどの程度考えておけばよいか、といったような問題にも応用ができると考え、表題のような実験的研究を試みた。実験にあたっては、次のような制限がある。

- i) 基礎的な実験であるので相似律は無視し、外力が模型について見積れば良いとした。
- ii) 同様の理由から対象物の形はできるだけ簡単な球体とした。
- iii) しかし、これだけでも実際の構造物の設計に多少とも役立つよう留意した（これは制限ではない）。

2. 実験の方法

序論でのべたように、この研究は球状物体が水面付近におかれ、風と波の作用を同時に受けた場合、どんな外力を受けるか、ということ調べるわけである。したがって風洞水槽中に球状物体を設置して風と波を同時にあってその応答を調べれば一応の目的は達せられる。

球状物体：試験体の概要

は図-1に示す。これは球状物体に板ばねをつけたもので筆者の一人の手馴れたものである。板ばねには4カ所にストレインゲージがとりつけてあり、2カ所の

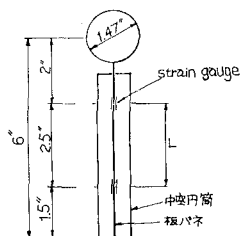


図-1 実験装置の一部
ことによって力を求めることができる。板ばねは波の影響を小さくするため、円筒形のおおいをつけてある。これは何か他の方法もありそうに思えたが、この研究が多少実験材料の入手の不自由なバンコックの AIT で行なわれたため、次善の方法で行なうほかはなかった。これを風洞水槽の中に設置するわけである。

風洞水槽：風洞水槽は AIT に設置されている小形の風洞に長さ 20 ft の水路をとりつけたものである。水路断面は 1.5 ft×1.5 ft の角型のもので水深は 0.5 ft、フェッチは 10 ft 前後のものである。この風洞は英国供与のもので非常に良い性能をもっている。風洞水槽内には波高計とビトー管がすえつけられている。

さて実験を行なうにあたっては結果の一般性をできるだけ保持したいため、この風洞水槽の特性を調べておく

必要がある。図-2には風速の鉛直方向の分布を示す。図中 z は水面より測った高さである。また U は風速である。これによると、水面上 10 cm まではほぼ対数則をみたしていることがわかる。それで基準風

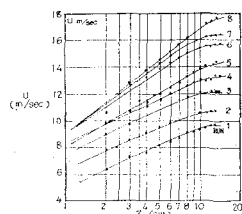
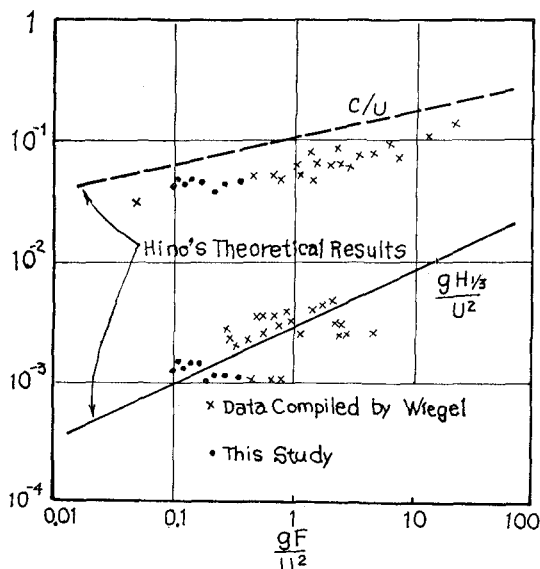


図-2 実験風の特性

速としては水面上 10 cm の高さの風速を U_{10} と表わすものとする（通常の場合と異なり水面上 10 m の高さの風速ではない）。そこで一応境界層の影響も少ないとすればほぼ発達した乱れをもった風速分布となっていると判断してよい。

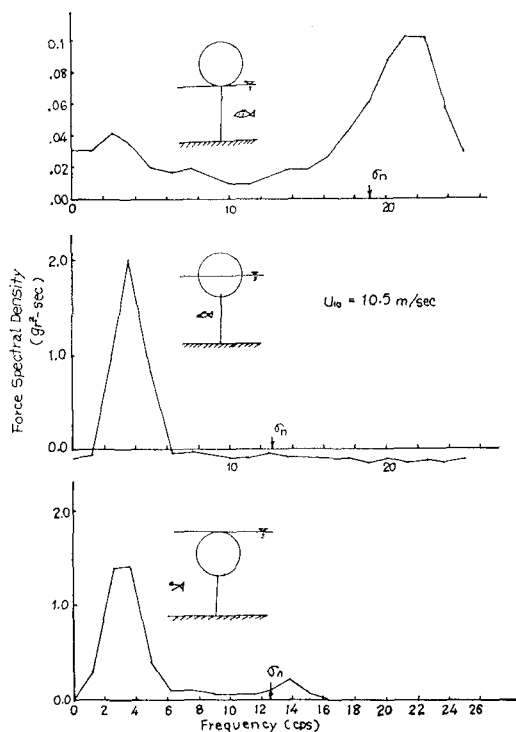
次に波に関しての性質を調べる。風波についてはパワースペクトルも作成し、ピークは 3~5 cps あたりに存在することがわかったが、もっと直接に日野³⁾のフェッチに関する式と比較することにした。日野は Wiegel の

* 正会員 工博 東京工業大学助教授 工学部土木工学科
** 台湾電力技師



図—3 実験波の特性

データを用いて理論値と比較しているが、図—3はこの論文の実験値をプロットしたものと、日野の理論値が示されている。図中、 F はフェッチ長、 g は重力の加速度、 c は波速である。図—3より判断すると、実験値は理論値と良い一致を示している。このような小規模の水路でもこのような良い精度の結果がえられるということはこの理論式の精度が非常に良いことを示している。そ



図—4 外力のスペクトル (1)

れと同時に小さい水路内で得られる風波に関する実験値も十分に実用になる可能性のあることを示している。

直接の実験は図—4の中に模式的に示されているように水中に球が全部没した状態、静水面上に半分露出した状態、水面上に全部姿を現わした状態の3種の状態について、この質量—ばね系の風力、波力の合成力に対する応答を調べた。最終的には外力を求めるわけであるが、例によって球—ばね系ではまず変位 x がわかるから、次のような線型理論を用いて変位 x を外力 $F(t)$ に変換する。

まず例によって m を質量、 c を構造粘性、 k をばね定数として

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (1)$$

とおき、 $F(t)$ をさらに、

$$F(t) = \frac{1}{2} C_a \rho_a A_a (U_0 - \dot{x})^2 - C_m \rho_w A_w \dot{x} \ddot{x} + \frac{1}{2} C_a \rho_w A_w (U - \dot{x}) |U - \dot{x}|$$

$$+ C_m \rho_w V_w (\dot{U} - \ddot{x}) \quad (2)$$

とおく。ここに U : 波による流速、 C_a : 抵抗係数、 C_m : 質量係数であって、水中部分と空中部分では異なる値を用いなくてはならない場合がある (たとえばレイノルズ数が異なる)。 A : 露出断面積、 V : 球の体積であって添字 a は空中にある場合を、 w は水中にある場合を示す。 ρ は密度であって添字 a は空気の、 w は水のものである。式(2)の第2項は空気の慣性抵抗で小さいから無視する。また $\dot{x}$, $\ddot{x}$ は U , $\dot{U}$ に較べて小さいとして無視すると

$$F(t) = \frac{1}{2} C_a \rho_a A_a U_0^2 + \frac{1}{2} C_a' \rho_w A_w U |U| + C_m \rho_w V_w \dot{U} \quad (3)$$

がえられる。第2項では水に関する C_a を区別して C_a' とかいた。Airyの理論を用いて高次の項を省略すると、

$$M\ddot{x} + c\dot{x} + kx = c_0 - \alpha \cos \theta + \frac{8\beta}{3\pi} \sin \theta \quad (4)$$

$$M = m + C_m \rho_w V_w \quad (5)$$

$$\alpha = C_m \rho_w V_w (2\pi^2 H / T^2) \times \left(\cosh \frac{2\pi(y+d)}{L} \right) / \left(\sinh \frac{2\pi d}{L} \right) \quad (6)$$

$$\beta = \frac{1}{2} C_a' \rho_w A_w (\pi^2 H^2 / T^2) \times \left(\cosh \frac{2\pi(y+d)}{L} \right) / \left(\sinh \frac{2\pi d}{L} \right)^3 \quad (7)$$

$$\theta = \left(\frac{2\pi}{L} x - \frac{2\pi}{L} t \right) \quad (8)$$

$$c_0 = C_a \frac{1}{2} \rho_a U_0^2 A_a \quad (9)$$

がえられる。ここに H は波高、 T は波の周期、 d は水深、 y は静水面より測った球の位置である。式(8)の x

は0としてよい。波の反射等は無視しているの、かなり乱暴な解析になっているが、実用上やむをえず、また、これによってもなかなか面白い結果がえられている。もっともここで重要なのは式(4)の右辺ではなく左辺であって、左辺の応答関数はすぐ求められるから、 $F(t)$ の実験値の方も求められることになり、式(4)の右辺と比較することも可能である。

3. 実験結果

前節でのべたように球一ばねシステムは一種の変位一力変換器であるから、この周波数特性から外力を実験的に推定することができる。前節の式(4)は正弦波に関する表現であって、実際の外力はランダム性の強いものであるから、式(4)の右辺はそのまま用いられないことは明らかである。そこで得られた外力をスペクトル分解してみることが考えられる。図-4には実験の中では風速の比較的遅い場合についての結果を示している。図中、縦軸は力をパワースペクトル的に表現したもので変な次元になっている。パワースペクトルに分解するにはTukeyの方法により、 χ^2 分布を計算すると80%くらいの信頼性になっていることがわかった。少し精度は良くなかったが、他に力をフーリエ級数に分解して比較も行ない、スペクトル法とかなり良い一致をみているので、全体として信頼できる結果がえられたようである。紙面の都合でフーリエ級数による方法は省略する。

さて図-4を上から順に見て行くと外力のスペクトルが次第に変化して行くのがわかる。まず、一番上の全部静水面上に球が姿をあらわした場合には外力は非常に小さいことがわかる(グラフのスケールが一番上の図では異なっていることに注意)。 σ_n はこの構造物の固有振動数を示す。外力は明らかに直流成分をもち、かつ、固有振動数に近い所にも成分が現われている。この外力は外力とはいってもこの系の感じることできた外力であるから、真の外力ではないことはもちろんである。したがって22cps付近のピークは自励振動的なものと考えられる。原因は多分風の中の乱れ成分であろう。残念なことにHotwireの信頼性が低く、このことは確かめられなかった。波高は1~2cmくらいのものがあってずいぶん球にあたっていることが観察されたが、力としてはあまり大きなものではないようである。あるいは鉛直方向の力となっているのであろうか。D.C.成分は後に示すように、風による形状抵抗、いわゆる抗力と考えられる。

次に真中の図ではピークは4cpsあたりにあらわれる。これは紙数の関係でいれられなかったが、波のスペクトルのピークと一致しているので明らかに波による力である。この値は非常に大きく、固有振動数(見掛けの質量が増加するので小さくなる)とは関係がない。この

ことから波による力は風の力の4~5倍になることがわかる。実物では100倍位になるであろう(これはこの実験結果から計算が可能となった)。なお、負のスペクトル密度が現われたのは誤差によるものであろう。

最後に一番下の図をみると、再び外力は減少する。しかしピークは波のスペクトルのピークと一致している。このことからみると、この3種では半分露出している場合に波力は一番大きくなる。この点もう少し細かく実験をやってみる必要がある。注目すべきことは固有振動数のあたりに小さくピークが出現している。これは、水面のランダムな波より成分を拾っているのではないかということが考えられる。図-5は $U_{10}=16.1\text{ m/s}$ の場合であって、このことがもっとはっきりあらわれている。つまり、一番下の図をみると σ_n のあたりにかなり大きいピークが現われている。これはこの研究で得られた一番重要な結果である。すなわち海面直下に設置された水中構造物は強風時には自励振動を行なう可能性がある。もちろんこの可能性はpossibilityであってprobabilityはそう高くないであろう。この結果は特別な風洞で特別な形状の物体について得られたものであるから。しかし、予期しない災害の生ずる場合もあるので用心しておくにこしたことはないと思われる。なおその他の特徴は図-4の場合とほぼ同じであるが、一番上の図で波のス

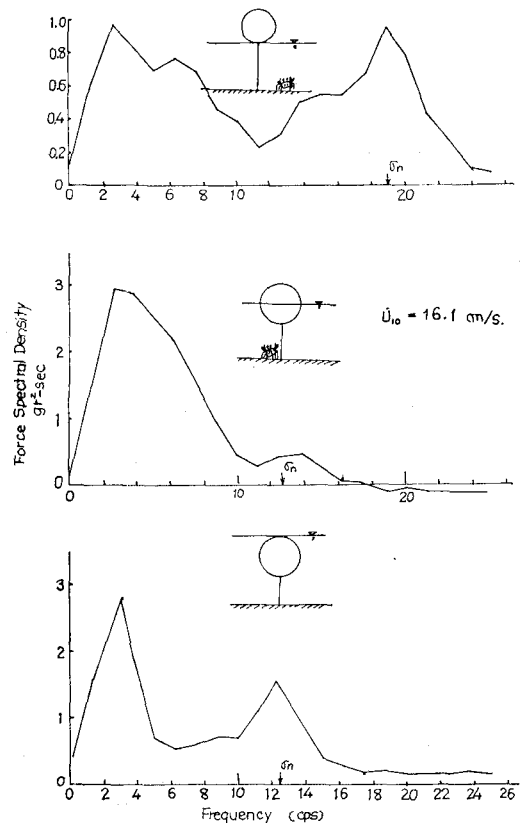
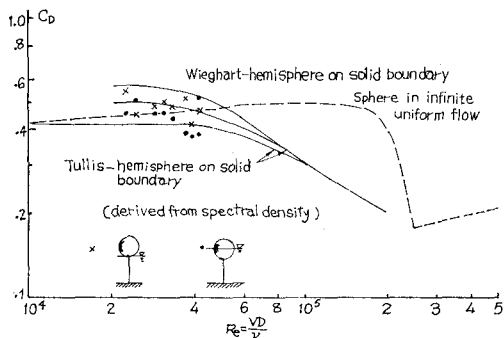
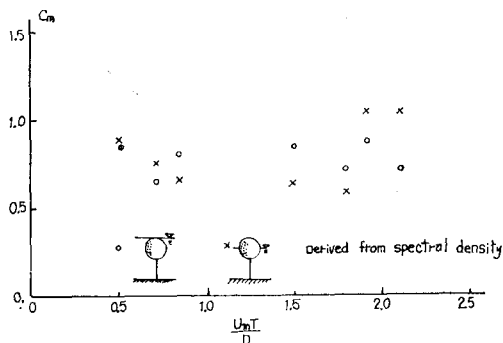


図-5 外力のスペクトル (2)



図—6 抵抗係数



図—7 質量係数

ベクトルのピークにあたる 3 cps あたりにもピークが生じている。これは波高が高くなって波の影響のあることを示している。

最後に 図—6, 7 をみると、図—6 では D.C. 成分より計算した球の抵抗係数が示されている。これは驚くことに Tullis の行なった固定板上に半球をおいた結果と一致している。このことから球の C_D はほぼ普通の C_D と考えてもよいようである。図—7 では質量係数 C_m と振動周期の関係が示されている。これは式 (4) の α からパワースペクトルの成分を用いて無理に求めたものであるが、0.5~1.0 くらいの通常値を示している。このようなパラメータのとり方をするると C_m が振動周期の関数になるようにみえるものであるが、それはパラメータのとり方が不適当なためである。この点については稿を改めてのべたい。

4. 結 論

このような制限のついた実験によって得られた結論は次の通りである。

- (i) 風による力は波の力に比べて非常に小さい。
- (ii) 波力は球体が水中に全没している方が、半分だけ姿をあらわしている場合より小さくなる。
- (iii) しかしそのような場合には強風時に自励振動の発生する恐れがある。
- (iv) C_m , C_D はこの実験の結果を信頼する限りにお

いて風力と波力を同時に受ける場合に、慣習的な値を用いることができる。

5. 謝 辞

この研究は、筆者の一人(椎貝)は教授として、他の一人(張)は学生として AIT に滞在した時に行なわれた研究の一つである。AIT は研究用材料の入手について必ずしも満足とはいえない土地にあるにもかかわらず全力をあげて筆者らの研究を援助してくれた。また南北ベトナムを含む19カ国の学生もこの研究に協力した。深甚な謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) Blackman, R. B. and J. W. Tukey (1959): *The Measurement of Power Spectra from the Point of View of Communications Engineering*, Dover Publications, New York.
- 2) Harleman, D.R.F. and W.C. Shapiro (1958): Investigation on the Dynamics of Moored Structures in Waves, MIT Hydrodynamics Lab. T.R. No. 24, also *Proc. Seventh Conf. Coastal Eng.*, (1961), Chap. 41, pp. 746-761.
- 3) Harleman, D.R.F. and John H. Nath (1967): The Dynamic Response of Fixed Offshore Structures to Periodic and Random Waves, MIT Hydrodynamics Lab. T.R. No. 102.
- 4) Kato, Hajime and Kikuo Sano (1970): Measurements of Wind Velocity Fluctuation over Waves, Ministry of Transport, Japan, *Report of Port and Harbour Research Institute* Vol. 8, No. 1, pp. 3-35.
- 5) Hino, M. (1966): A Theory on the Fetch Graph, the Roughness of the Sea and the Energy Transfer Between Wind and Wave, *Coastal Engineering in Japan*, Vol. IX, pp. 11-25.
- 6) Keulegan, G.H.: Wind Tides in Small Closed Channels, *J. Res. Natl. Bureau of Standards*, Vol. 46, No. 5, pp. 258-381.
- 7) Kahn, A.K.M.H.R. (1965): Drag Characteristics of Hemisphere and Cones in Non-Uniform Flow Fields, *Thesis No. 109*, AIT, Bangkok, Thailand.
- 8) Kamphuis, J.W. (1969): Introduction to Wave Spectrum Analysis, *C.E. Report No. 64*, Queen's University at Kingston, Ontario.
- 9) Longuet-Higgins, M.S. (1952): On the Statistical Distribution of the Heights of Sea Waves, *J. Marine Res.*, Vol. II, No. 3, pp. 245-266.
- 10) Morison, J.R., O'Brien, M.P., Johnson, J.W. and S.A. Schaaf (1950): The Force Exerted by Surface Waves on Piles, *Petroleum Trans.*, Vol. 189 TP 2846, pp. 149-54.
- 11) Roll, H.U. (1965): *Physics of the Marine Atmosphere*, CH. 4, Academic Press Inc., New York.
- 12) O'Brien, M.P. and J.R. Morison (1952): The Force Exerted by Waves on Objects, *Trans. Amer. Geophys. Union*, Vol. 33, No. 31, pp. 32-38.
- 13) Plate, E.J. and John J. Nath (1969): Modeling of Structures Subjected to Wind Waves, *Journal Waterways and Harbors Division, ASCE*, Vol. 95, No. WW4, Proc. Paper 6904, Nov., 1969, pp. 491-511.

- 14) Schlichting, H. (1968): *Boundary Layer Theory*, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York.
 - 15) Shi-igai, H. and T. Kono (1969): Study on Vibration of Submerged Spheres Caused by Surface Waves, *Coastal Engineering in Japan*, Vol. 12, pp. 29-40.
 - 16) Sibul, O. (1955): Laboratory Study of the Generation of Wind Waves in Shallow Water, *Beach Erosion Board T.M. 72*, Washington, D.C.
 - 17) Sutherland, A.J. (1967): Spectral Measurements and Growth Rates of Wind-Generated Water Waves, *Dept. of Civil Engrg. Tech. Rep. No. 84*, Standford Univ., Standford.
 - 18) Stewart, R.W. (1961): The Wave Drag of Wind over Water, *J. Fluid Mech.*, Vol. 10, No. 2, pp. 189-194.
 - 19) Wu, Jin (1969): Laboratory Studies of Wind-Wave Interactions, *J. Fluid Mech.*, Vol. 34, pp. 91-121.
 - 20) Tullis, J. P. and G. H. Flamner (1970): Free Surface, Velocity Gradient Flow Past Hemisphere, *J. Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 96, No. 7, pp. 1485-1503.
-