

海中係留球の波浪応答

吉原 進* ・ 河野 健二**・ 高 畦 博***
玉 井 武****・ 山本 喜裕*****

1. は し が き

固有周期が大きく、よって比較的大きな振幅で振動を行うような海洋構造物に働く波力に、Morison 式を直接適用することに疑問を感じて、著者の一人は海中係留球を例として取り挙げ、その波力および力学モデルを提示し、規則波による実験結果から、全ての波力に関する係数を定め、これらと従来から得られている結果との対比、検討を行って、すでに報告した¹⁾。本論文はそれらをさらに発展させ、不規則波に対してもその力学モデルおよび同様な解析が妥当であることを確認することを主目的として行った研究をとりまとめたものである。

2. 海中係留球の力学モデルと規則波による応答

先に著者の一人は、図-1 に示す海中係留球に対して

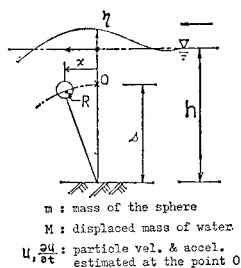


図-1 海中係留球のモデル

$$\begin{aligned} & (m+C_m'M)\frac{d^2x}{dt^2} + C_a'\frac{3M}{8R}\frac{dx}{dt}\left|\frac{dx}{dt}\right| \\ & + \frac{(M-m)g}{s}x \\ & = C_mM\frac{\partial u}{\partial t} + C_a\frac{3M}{8R}u|u| \dots\dots\dots(1) \end{aligned}$$

なる式で、その運動を記述しようとする力学モデルを提示した。式(1)の左辺第1項は水の付加質量を含めた球の慣性力、第2項は運動する球に作用する水の抵抗力、

第3項は復元力を、また右辺第1項は球に作用する水の慣性力、第2項は同じく水の抵抗力を表わす。

規則波による実験から、上式中の各係数を求め、その結果もすでに示したところであるが、以下の計算に必要なものを簡単に再掲する。まず付加質量係数 C_m' は 0.49 と一定であり、抗力係数 C_a' は 図-2 に示すように球の応答速度の関数として、また質量力係数 C_m および抗力係数 C_a はそれぞれ 図-3, 4 に示すような水粒子速度との関係を有していた。なおこれらの図中の実験値は以下の計算に採用した値である。

一方同じ係留球に対して、波力を水粒子速度と球の応答速度との相対速度を用いて表現することも度々行なわれているので、この点についても若干の検討を行った。この場合の運動方程式は次式のようにする。

$$\begin{aligned} & (m+C_m'M)\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{(M-m)g}{s}x \\ & = C_mM\frac{\partial u}{\partial t} + C_a''\frac{3M}{8R}\left(u - \frac{dx}{dt}\right)\left|u - \frac{dx}{dt}\right| \dots\dots\dots(2) \end{aligned}$$

上式に対しても、やはり規則波による実験結果から、抗力係数 C_a'' に対して 図-5 に示すような値が得られているが、他の係数の場合と異なり、この C_a'' の決定においては、共振点付近を除いた部分で運動方程式のつり合いに若干の問題のあったこともすでに述べたところである。しかしこの形式の運動方程式で表わされる場合についても、不規則波に対する応答を求め式(1)で得られる結果との差異に注目した。

式(1)あるいは式(2)はいずれも非線形微分方程式であり、それらの解を簡単に求めることはできない。ここでは、まず式(1)を等価な線形系に置換して定常応答解を求めた。その結果が 図-6 の実験値で、球の応答変位振幅に対する波浪の振幅の比で表示している。この計算に採用した各々の係数は $C_m'=0.05$, C_m , C_a については先に示したようにパラツキが大きい、図-3 および 4 中の直線で近似した。また規則波による実験の結果も計算値に対応する2ケースのみを同図上に再度プロットした。低周波数域での実験データが少ないが、共振点付近での全てのデータは非常によく対応しており、この

* 正会員 工博 鹿児島大学教授 工学部海洋土木開発工学科

** 正会員 工博 鹿児島大学講師 工学部海洋土木開発工学科

*** 正会員 鹿児島大学助手 工学部海洋土木開発工学科

**** 正会員 佐伯建設工業 K.K.

***** 日本国土開発 K.K.

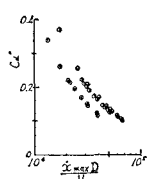
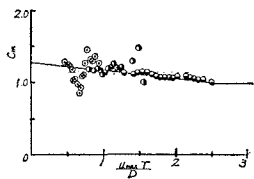
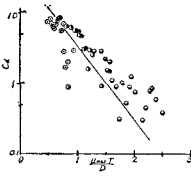
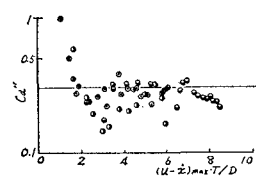
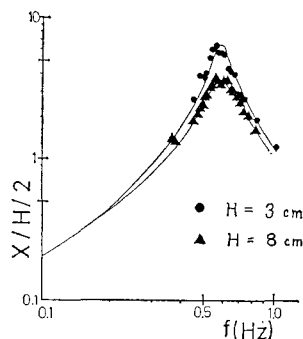
図-2 抗力係数 C_d' 図-3 質量力係数 C_m 図-4 抗力係数 C_d 図-5 抗力係数 C_d'' 

図-6 模型球の共振曲線図

計算に対して選ばれた各係数がこの周波数範囲では比較的良好な現象を抽象しうものと思われる。そこで以下の不規則波に対する応答計算においても、この組み合わせを選ぶことにした。

なお図-6によると、球変位と波浪の振幅の比は、波高が大きい時に小さくなるが示されているが、これは非線形性によるものである。一方この場合の計算では、いわゆる等価な線形減衰定数が、大きな波高に対する程大きな値となって評価されていた。これは規則波に対しては、この例のように等価な減衰定数の値を適切に選ぶことで、ある程度非線形性をカバーすることができることを示すものである。

3. 不規則波に対する応答の計算

つぎに不規則な波浪に対する応答を求める方法を簡単に述べる。海洋構造物の波浪応答に関する研究はすでに数多く行なわれている。それらを大別すると応答を周波数領域で取り扱うものと時間領域で取り扱うものとなる。前者は対象とする海洋構造物が原則として線形な振動系で表わされる場合に限るが、波浪の周波数特性に関する情報はすでに数多くあり、また設計計算といった現実的な要請にも比較的簡単に答える。しかし本来非線形な振動系である海中係留球を出来るだけ忠実に取り扱おうとすれば、これを解析的に扱うことができないので、step by step による時間領域における計算によらざるを得ない。

ここでは、海中係留球の力学モデルの妥当性を検討することに主眼を置くこと、および波浪の時系列が実験によって得られていることもあって、後者の方法によるこ

とにした。

まず式(1)あるいは式(2)のような運動方程式の入力として、不規則波に対する水粒子速度および同加速度的時系列が必要となる。これら両者を直接計測することは困難であるので、不規則に変動する水面変動からそれらを求めねばならない。この方法についてもすでに数多くの研究が発表され、それぞれの特徴が述べられている。運動方程式の入力となるということから、これらの評価についておろそかにできるものではないが、本研究では水粒子速度や同加速度そのものを研究の対象としているものでないということから、比較的簡単に計算が行なえ、しかも精度についても大きな問題のないといわれる次の2通りの方法によった。

第1の方法は、得られた水面変動の記録に対し、いわゆる線形フィルターからの出力として水粒子速度を求め、かつこれを数値的に微分することによって同加速度を求めるという方法²⁾であり^{*}、第2の方法は実験により得られた水面変動をフーリエ変換して成分波に分解し、振幅の大きいいくつかの成分波に対して微小振幅波理論を適用して水粒子速度および加速度を求め、それらを再度重ね合わせることによって不規則波に対する水粒子速度、同加速度を求める^{**)}というものである。

このようにして、運動方程式中の水粒子速度、同加速度が確定すると、式(1)の左辺の第2項を非線形のままとするか、等価な線形系に置換するかは別にして、各係数を定めれば、step by step による計算が可能になる。ここではその計算法として、いわゆる Newmark の β 法によることにした。この β 法は、振動系の固有周期と計算の時間間隔に対するゆるやかな条件を満しさえすれば、収束し易く、しかも応用範囲の広い方法であるといわれている。

式(1)に示すように抗力を非線形のまま扱う場合、その係数 C_d' はすでに図-2に示したように、応答速度の関数であるから、抗力項に対して、すなわち C_d' に対して本来 iteration を行う必要があるが、今回はこの C_d' は一定とみなした。また計算に用いたデータ個数は512個に統一した。したがって、今回の計算ではフーリエ変換に対する分解能は0.1 Hz 弱となり、計算精度は必ず

* 以下の図にはこの方法によるものに対し、L.F. と略記する。

** 同様に F.T. と略記する。

しもよくない。しかし本論文では絶対値そのものが問題でなく、常に相対的な議論となるので、この程度は許容できよう。

4. 不規則波による実験の概要と結果

不規則波による実験は、すでに報告した規則波による実験と同じ装置、模型球等を使用して行なった。その概要は次の通りである。水深 85 cm 一定とした高さ 1.2 m、奥行き 1.0 m、長さ 30 m の 2 次元造波水槽の中程に、

直径 11.7 cm の剛な模型球を伸縮の無視できる 0.3 mm 径のピアノ線で係留した。係留球中心は静水面下約 15 cm とした。なお前回は係留糸の下部に張力計を挿入していたが、今回は取り付けて

いない。低慣性モーターで駆動できるフラップ式造波板に、ノイズ発生器からの 0~200 Hz のホワイトノイズを 12 本の狭帯域バンドパスフィルターを通して所用のスペクトルを有する不規則波が得られるように変形した信号を与えて駆動させた。模型球の固有周期が約 1.7 sec なので、この前後にピークを有するよう 4 通りの波を実験波として採用した。このような不規則波を発生させた後、適当な時間が経過して、発生した波が定常不規則な状態になったと思われる頃に、水槽側面から、模

型球と同じ高さに設置された 16 mm シネカメラにて、水面の動きと伴に球の動きを撮影、記録した。このようにして得たフィルムの各駒から、水面変動と模型球の水平変位を読み取ってデジタルデータとした。それらの約 15 秒間の例を 図-7 に示す。これらの各図から、Wave I のレベルが他のものより少し小さめであるが、いずれの実験波も定常ランダム過程にあるとみなすことができる。また各実験波に対する模型球の応答変位のパワースペクトル P_x を水面変動のそれ P_η とともに 図-8

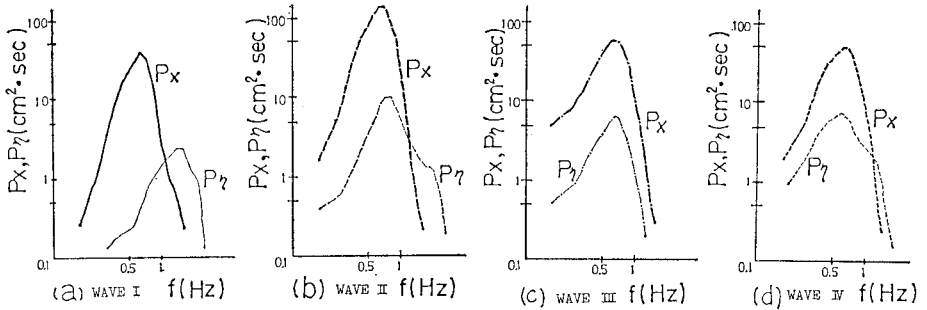


図-8 実験波と応答変位のパワースペクトル

に実験波毎に示す。これらの各図によると、卓越周波数の異なる不規則波入力に対して、模型球はその固有周波数付近で大きく振動しており、1 自由度振動系の特徴がよく現われている。なお模型球には原理的には高次の基準振動も生じうるが、この結果からは、模型球は基本モードのみで振動していたことすなわち係留球を 1 自由度振動系で抽象することが可能であることがわかる。模型球の応答変位と入力のパワースペクトルの比の平方根は、その模型球の周波数応答倍率となる。これを求めたのが、図-9 である。これは先に示した 図-6 に相当するものであるが、両者を比較すると細部に至るまでよく一致しているとはいえない。しかし規則波の結果のところでも述べたように、波浪の振幅レベルが小さいものほど、大きな応答倍率を示すことやその他全般的な傾向はよく対応しているといえよう。

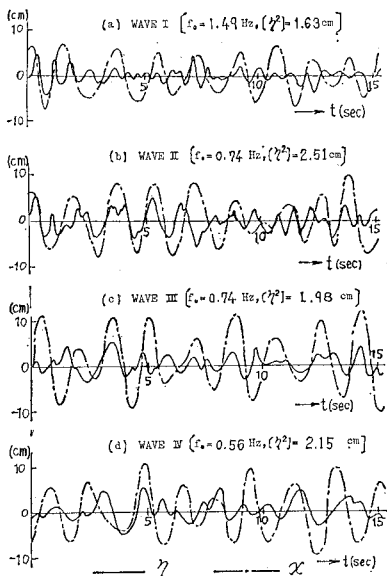


図-7 実験波と模型球の応答変位：実験

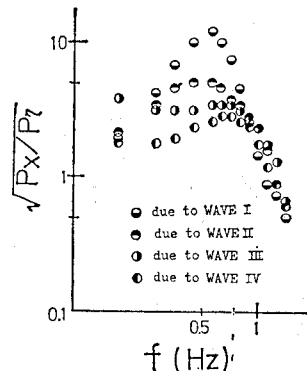


図-9 周波数応答曲線 (F.T. Nonlinear (1))

5. 実験と計算の結果およびその考察

不規則波に対する計算結果の一例を図-10 に示す。同図の縦軸は実験波 η ，模型球の応答変位 x [measured] および実験波より算出される水粒子速度 u ，同加速度 $\partial u / \partial t$ ならびに計算された球の応答変位 x [computed] の値であるが，それぞれの最大値との比を取って基準化している。またそれぞれの二乗平均の値も並記した。同図によると，水面変動と水粒子速度がほぼ同位相であること，これらに対し水粒子加速度はほぼ 90° 位相が進んでいること，しかもこれらはともに比較的短周期波成分が多い類似した周波数特性を持つことなどが明らかである。一方模型球の応答変位は，実験値と計算値とは，最大値および二乗平均値が少し異なり後者が少し大きくなっているものの，周波数特性，位相とも極めてよく一致しており，計算に伴う諸種の仮定がほぼ妥当であることがわかる。なお計算のための初期値は，実験値の初期値より求めた。

次に各実験波毎に，図-10 に示したような計算結果から，パワースペクトルを求め一括して示したのが図-11 である。これらの図には，水粒子速度の推定にリアフィルターを用いたもの，フーリエ変換によったもの，さらに非線形のまま計算したもの，等価な線形系に置換したものおよび式 (2) で表わされる非線形のもの等を含んでいる。これらの各図によると，とくに Wave I に対する結果のパラッキが大きい，全般的にはよく類似しているといえよう。すなわち卓越周波数，同点のパワーの

値および形状において，比較的よく類似している。ただ実験の結果にどの場合が一番よく一致しているのか，すなわちどの方法が一番精度的に優れているかの判定は，実験波によって少しずつ大小関係が逆点しているのが困難である。しかしこの計算のために選ばれた係数は，パラッキの大きいものから選ばれているもので，それらの選定の仕方によっては，さらにより結果の得られる可能は十分あると思われる。

また係留球を式 (2) のように相対速度を用いて表現した場合の結果については，ここで行なった計算の範囲では，とくに不都合であるということとはできず，他の結果と大差はない。規則波の実験結果の解析において，この場合は，固有周期と異なる周期の波浪に対しては運動方程式のつり合いの問題を生じたことも事実である。しかし不規則波入力の場合，係留球はフィルター効果により，固有周期付近で共振現象を起し，固有周期と異なる周期成分に対しては大きな応答を示さない。そのために式 (1) の場合と大差のない結果を得たものであろう。したがって不規則波に対しては式 (2) の表現も十分可能であるといえよう。

6. む す び

以上海中係留球に対してかつて提示した力学モデルを用いて，不規則波に対する波浪応答を計算し，実験の結果と比較して若干の検討を行なった。その結果から，不規則波に対してもほぼ妥当な結果を与えること，また相対速度を用いた場合も，不規則波に対しては，係留球の

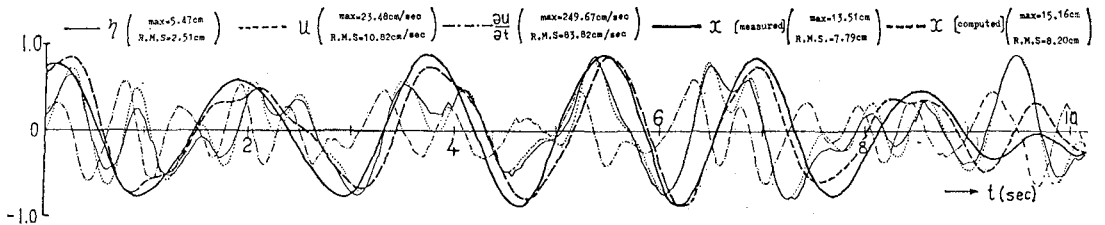


図-10 模型球の波浪応答：実験，計算 (Wave II, L.F., Linear)

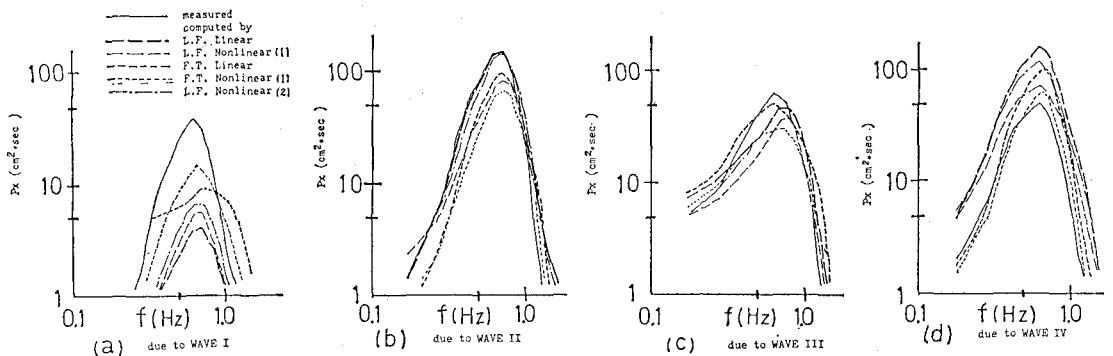


図-11 模型球の応答変位のパワースペクトル

選択的共振の効果により共振点からずれた周波数成分が小さくなりがちなこともあって、規則波におけるほど不都合は生じないようであることなどが明らかになった。ただし波力に関する各種係数は一般にバラツキが大きいものであるので、その決定については十分慎重であらねばならないこと、さらに一層この種の基礎的データの集積が必要であることなどを指摘して本論文をむすぶ。

最後に、本研究を遂行するに当り、特に実験の実施に際し、種々御協力頂いた当海洋土木開発工学科海工学講座の佐藤道郎助教授、中村和夫技官、同海洋構造工学講

座の愛甲頼和技官に謝意を表するものである。またプログラムの開発に当り、大崎順彦著「地震動のスペクトル解析入門」を一部参照した。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 吉原 進・上原教善：海中係留球に作用する規則波波力，第 25 回海岸工学講演会論文集，pp. 387～391, 1978.
- 2) Wheeler, J. D.: Method for calculating forces produced by irregular waves, Proc. 1st Offshore Technology Conference, pp. 71～82, 1969.