

海中ブイ式波高計の動揺特性および計測精度に 及ぼす影響について

大 中 晋*・堀 沢 真 人**

1. ま え が き

近年の海岸・港湾構造物は沖合いに展開しており、その計画・設計にあたり、大水深域における波浪データの必要性が一段と増してきている。従来大水深域での波浪観測はブイ式波高計によるのが一般的であり、これまでにさまざまな波高計が開発されている。これらは測定方式によって、海面上に浮かべたブイの上下加速度を測定するもの（例えば光易ら，1973；橋本ら，1980）と，海中に係留されたブイに水圧式波高計を搭載したもの（橋本ら，1978）とに大別される。いずれも表面波形を得るためには何らかの変換が必要となる。表面波形が直接測定できるものとしては，浅海域で多用される超音波式波高計がある。しかしながら大水深域に適用する場合には，測定精度や設置作業に問題がある。

そこで筆者らは大水深域における表面波形の直接測定を目的として，海中係留ブイ搭載型の超音波式波高計を考案した。これは，係留索長を変えることにより任意の水深に対応可能である。この波高計の超音波送受信部は人工水平台（ジンバル）上にあるため，ブイが傾斜しても常に鉛直方向の距離を測定するようになっている。また係留索が，波および流れによってカタナリー変形しないように，十分な余裕浮力をもたせることを前提としている。

海中ブイ式波高計により計測された波浪データには，ブイが動揺することによる誤差が含まれる。橋本らもこの点については種々検討を行っているが，ブイの動揺と誤差の関係に関する議論は十分にはなされていない。そこで本研究では，ブイの動揺解析モデルを提示し，その妥当性を模型実験により確認するとともに，ブイの動揺が計測精度に及ぼす影響について，数値シミュレーションにより検討することを目的とする。

2. ブイの波浪中動揺特性

(1) 実験方法および実験条件

ブイの形状および係留索長の違いによる動揺特性を把

握するために，円柱および球の模型を用いた動揺実験を行なった。実験は東亜建設工業㈱技術研究所の全長 50 m，幅 1.0 m，深さ 1.2 m の二次元水槽を用いた。水深は 96 cm の一定水深とし，図-1 に示すような一点係留された模型を設置し，動揺量の計測を行なった。模型および索長の諸元を表-1 に示す。

表-1 模型諸元

模型	空中重量(g)	形状寸法(cm)	係留索長(cm)	
球	68.2g	ϕ 5.85	44.1	73.7
円柱	124.8g	ϕ 5.93 H 10.13	46.0	71.2

ブイの動揺量の測定は，二次元運動計測装置により行なった。これは，装置専用のカラーテレビカメラ視野内で選択された色の物体だけを識別抽出し，その X-Y 位置座標をビデオレイトで出力するものである。本実験では波の進行方向，直角方向および鉛直方向の動揺を計測するために，カメラを水槽上側および側面に設置した。また模型設置位置での水面波形を容量式波高計で，模型重心位置での流速を電磁流速計を用いて計測した。さらに反射率の測定用に，模型設置地点の前面に容量式波高計を設置した。実験は規則波および不規則波を用いて行なった。設定波高および周期は，規則波の場合は波高を 5 cm および 10 cm とし，周期を 1.0 s ～ 3.4 s の範囲で変化させた。不規則波の場合は，Bretschneider・光易型スペクトルをもつ波を目標として， $H_{1/3}$ を 5 cm および 10 cm， $T_{1/3}$ を 1.5 s および 2.5 s とした。サンプリング間隔は 20 Hz とし，計測時間は，規則波の場合は波が模型設置位置に到達後の 30 秒間とし，不規則波の場合

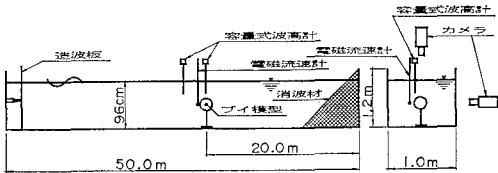


図-1 実験方法

* 正会員 工修 東亜建設工業(株) 土木本部技術研究所
** 正会員 東亜建設工業(株) 土木本部設計部

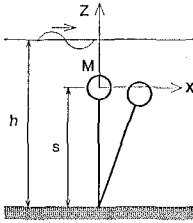


図-2 座標系

は120秒とした。

(2) 数値計算法

海中係留ブイの座標系を図-2 のようにとり、 x の正方向に進行する二次元微小振幅波中での動揺を考える。ここで、係留索は常に緊張しているとし、ブイは $x-z$ 平面内でのみ動揺するものとする。さらにブイに作用する波強制力がモリソンの式で与えられるものとする、ブイの x 方向運動方程式は次式で与えられる。

$$(M + \rho C_M' m) \ddot{x} = -\frac{(\rho m - M)g}{s} x + C_M K_M \ddot{u} + C_D K_C (u - \dot{x}) |u - \dot{x}| \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 M : ブイの質量、 ρ : 水の密度、 m : ブイの体積、 $u, \dot{u}$: ブイ中心位置での水平水粒子速度および水平水粒子加速度、 C_D : 抗力係数、 C_M : 慣性力係数、 C_M' : 付加質量係数、 $K_M = \rho m$ 、 $K_C = 1/2 \rho A$ 、 A : ブイの投影面積、 s : 係留索長（海底固定点からブイ中心まで）、 g : 重力加速度である。ここで C_M' はポテンシャル理論によって与えられる。

式(1)は非線型項を含んでいるために、解析的に解くことは困難である。そこでルンゲ・クッタ・ジル法により時間領域で数値積分する方法(時刻歴応答解析法)を用いた。不規則波中の計算で必要となる水粒子速度の時系列は、水面波形から線型フィルタ法を用いて行った。また水粒子加速度は水粒子速度を数値微分して求めた。

(3) 実験結果および計算結果

① 規則波中動揺特性

はじめに規則波中における動揺特性について、実験値と計算値との比較を行なう。計算に用いた C_D 、 C_M および C_M' は本来、波あるいは動揺の周波数に依存するものである。しかしここでは周波数によらない定数として、表-2 に示すような標準的な値を用いた。また実験波高が周期によって一定とならないので、計算においてはすべての周期で共振点付近の波高を用いた。図-3 は係留索長が長い場合の球および円柱の方向動揺量の実験結果および計算結果を示したものである。ここで横軸は波周期を表し、縦軸は動揺両振幅を波高で無次元化したものを表す。また実験結果は過渡応答の影響がほとんど見られなかったため、反射波の到達する以前の初期の数波を抽出し、解析に用いた。

表-2 C_D 、 C_M および C_M' の値

	C_M	C_M'	C_D
球	1.5	0.5	0.5
円柱	2.0	1.0	1.17

これより、両者とも表-2 の流体力係数を用いた場合の計算結果(図中の実線および破線)は、共振点付近でやや過大となっている。そこで球の場合には C_D を 0.6、 C_M' を 0.3、円柱の場合には C_M' を 0.7 として計算したところ(図中の一点鎖線および点線)、実験値に近い結果が得られた。この傾向は係留索長が短い場合も同様であった。

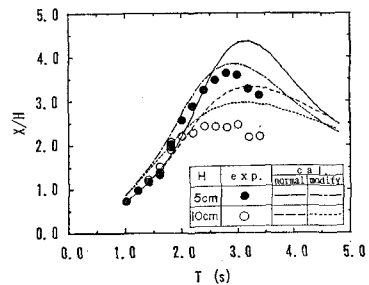
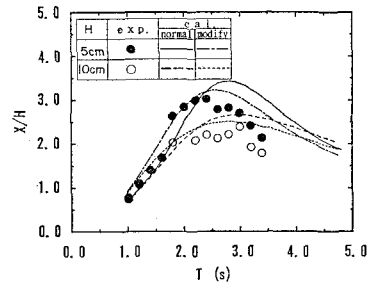
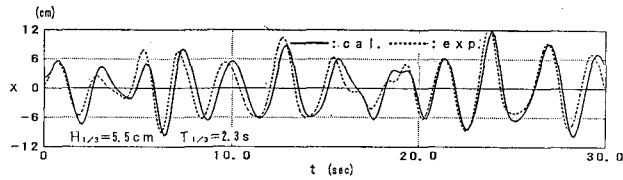
(1) 球の場合 ($s=73.7$ cm)(2) 円柱の場合 ($s=71.2$ cm)

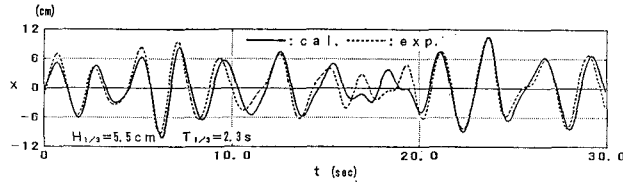
図-3 規則波中動揺特性の実験値と計算値の比較

② 不規則波中動揺特性

つぎに不規則波中における動揺特性について、計算値と実験値との比較を行なった。図-4 (1), (2) は、索長が長い場合の球および円柱の x 方向動揺量を示したものである。図中、実線が計算値を示し、点線が実験値を示している。なおこの図における流体力係数としては、表-2 で示される値を用いている。両者は良好な一致が見られるが、球の場合に計算値と実験値との間に多少の位相のずれが見られる。また両者のスペクトルを示したものが図-5 (1), (2) である。これにより球、円柱ともピーク付近で計算値が多少過大となっているものの、両者は良好な一致を示している。これらの違いは付加質量係数が正しく評価できていないことと、慣性力係数に

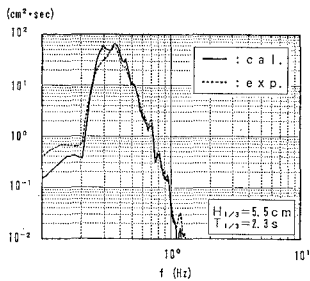


(1) 球の場合 ($s=73.7$ cm)

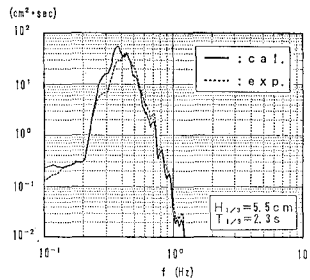


(2) 円柱の場合 ($s=71.2$ cm)

図—4 動揺波形の実験値と計算値の比較

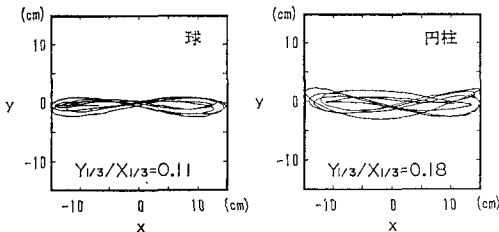


(1) 球の場合



(2) 円柱の場合

図—5 パワースペクトルの実験値と計算値の比較



図—6 動揺の軌跡

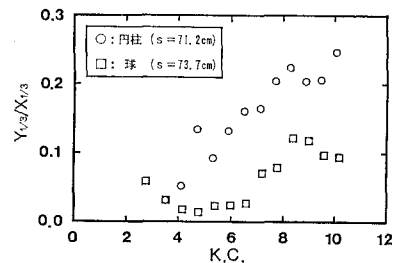
位相項を考慮していないために生じていると考えられる。そこで規則波中での実験結果に比較的一致している流体力係数を用いて計算したところ、さらに良好な一致が見られた。

以上の結果より、ここで用いた時刻歴応答解析モデルにより、ブイの動揺が精度良く推定できることが示された。

③ 波と直角方向の動揺について

波浪中のブイは、波の進行方向だけでなく、その直角方向にも動揺することが知られている。そこでつぎにこの横方向の動揺について述べる。

図—6 は今回の実験結果の中で、横方向の動揺が顕著であった $H=10$ cm, $T=3.0$ s における、球および円柱の動揺の軌跡を示したものである。 y 方向の動揺量は、球で x 方向の動揺量の 11% 程度、円柱で 18% 程度となっている。なお、この場合の Keulegan-Carpenter 数は、球の場合で 9.0、円柱の場合で 8.9 であった。楢木ら (1975) は、このような波と直交方向の力 (揚力) の出現条件は渦の発生およびその規模と密接な関係があると考え、K—C 数が支配的であることを示した。そこで設定波高 10 cm の場合に周期を変化させたときの y 方向の相対動揺量と K—C 数との関係を示したものが 図—7 である。これより円柱の場合は、K—C 数の増加と共に相対動揺量は一律に増加している。一方、球の場合は K—C 数が 7 を越えるあたりから、急激に相対動揺量の増加がみられる。



図—7 x 方向に対する y 方向の動揺量

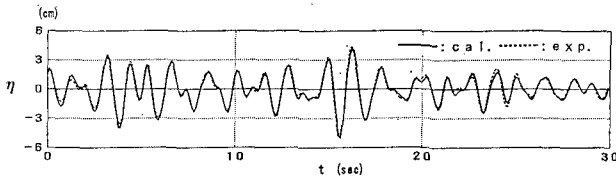
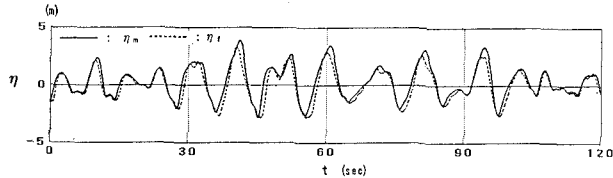
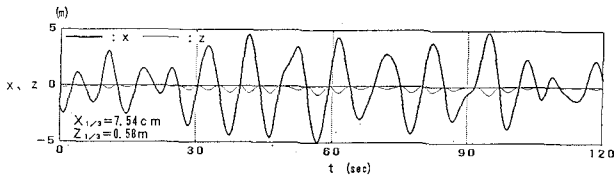


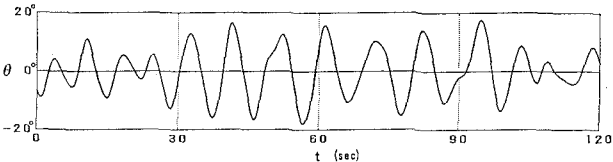
図-8 水面波形の実験値と計算値の比較



(1) 水面変動



(2) 動揺量



(3) 傾斜角

図-9 計算された水面変動、動揺量および傾斜角

3. 計測精度に及ぼす影響について

海中ブイ式波高計の開発に当たり、現地ではたしてどの程度のブイの動揺が生じるのか、また動揺するブイにより計測される波形データが、固定点で計測される波形データと、どの程度の違いが生じるのかを検討しておく必要がある。そこで動揺するブイから見たときの波形をシミュレートし、固定点で得られる波形との比較を行なう。

(1) 解析方法

いま固定点 ($x=0$ とする) で得られる水面変動を、各フーリエ係数成分波の重ね合わせで表示すると、式(2)のように示される。

$$\eta(0, t) = \sum [a_n \cos \sigma_n t + b_n \sin \sigma_n t] \dots \dots \dots (2)$$

ここで各フーリエ係数成分が、それぞれの周波数に対応する波速で伝播するものと仮定すると、ブイの動揺による位置の異なる地点での水面変動は式(4)で表される。

$$\eta\{x(t), t\} = \sum [a_n \cos \{-k \cdot x(t) + \sigma_n t\} + b_n \sin \{-k \cdot x(t) + \sigma_n t\}] \dots \dots \dots (3)$$

ここで $x(t)$ がブイの動揺によるはじめの固定点からの変位を表す。したがってこの $x(t)$ に式(2)の固定点

で得られる水面変動より推定される動揺量を代入することにより、動揺するブイから見たときのブイ真上の波形をシミュレートすることができる。

ブイにより計測される水面変動データには、動揺による波の進行方向の変位の影響とともに、ブイが傾斜することによる鉛直方向変位の影響も含まれる。そこで推定動揺量から傾斜角を算定し、鉛直方向の変位の影響も考慮した、式(4)を用いる。

$$\eta\{x(t), t\} = \sum [a_n \cos \{-k \cdot x(t) + \sigma_n t\} + b_n \sin \{-k \cdot x(t) + \sigma_n t\}] + z(t) \dots \dots \dots (4)$$

ここで $z(t)$ は鉛直方向変位を表す。

(2) 計算結果

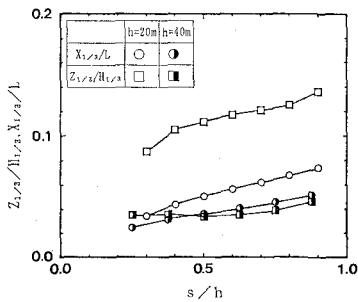
① 時系列波形の比較

はじめに解析方法の妥当性を確認するために、実験結果との比較を行なう。実験では動揺する模型から見た時の波形は得られていないので、ここでは模型設置地点の水面変動波形から位置の異なる地点での波形をシミュレートし、実測値と比較した。図-8は、模型設置地点の波形データから、その前面 43 cm 離れた地点における波形を計算したものである。図中の実線が計算された波形で、点線が実験値であるが、両者は良く一致している。

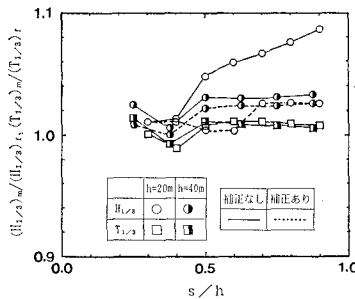
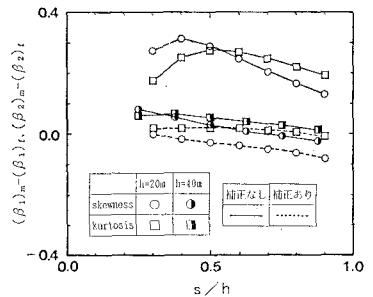
つぎに現地波浪を想定し、その波に対して動揺量の計算を行ない、動揺するブイから見たときの波形をシミュレートした。波諸元としては、ブイの動揺が顕著となるような高波浪を想定し、 $H_{1/3}=4.6$ m、 $T_{1/3}=9.4$ s とした。またブイの諸元は、直径 74 cm、空中重量 90 kg の球型ブイとし、動揺計算に用いる流体係数としては、表-2 で示される値を用いた。図-9 は水深 20 m 地点に係留索長 16 m で緊張係留されている場合の計算結果を示したものである。ここで(1)が水面変動波形を示し、図中の下添字 m はブイから見たときの値を、 f は固定点での値を表している。また(2)が x および z 方向変位を示し、(3)が傾斜角を示している。これより変位量の大きくなる、波の峯および谷で、両者の違いが顕著となり、 x 方向変位により、峯の到達時間が遅れ、逆に谷の到達時間が早まる。また z 方向変位により、峯では多少大きくなり、谷では小さくなる傾向を示している。この場合の x 方向の動揺幅の有義値は、7.5 m、 z 方向で 0.58 m であった。

② 各統計量の比較

つぎに同様の波諸元を用い、水深 20 m と 40 m にお



図—10 相対動揺量

図—11 $H_{1/3}$ および $T_{1/3}$ 

図—12 skewness および kurtosis

いて係留索長を変化させて計算を行なった。得られた波形から各統計量を算出し、水深および係留索長の違いによる比較を行なった。図—10は相対動揺量と係留索長との関係を示したもので、縦軸は x, z 方向の動揺量の有義値をそれぞれの地点での波長および有義波高で無次元化したものである。また横軸は水深で無次元化した相対係留索長を表している。これより x 方向の相対動揺量は係留索長が長くなるほど大きくなっている。またこの波諸元に対しては水深 20 m の方が動揺量が多い。これらは想定したモデルの固有周期と波周期との兼ね合いや作用波力の違いにより変化する。ちなみに本計算で想定したブイ諸元に対して、固有周期が本計算に用いた波周期とほぼ等しくなる係留索長は 14~15 m である。 z 方向動揺量については傾斜角の大きくなる水深 20 m の結果が 40 m のものに比べてかなり大きな値を示している。つぎに図—11は $H_{1/3}, T_{1/3}$ について示したものである。これより、周期については動揺することによる影響はほとんど見られない。一方、波高については特に水深 20 m の結果が、係留索長が長くなるほど過大となっており、 $s/h=0.9$ で 8.7% 程度の誤差が生じている。これは図—10より、 z 方向変位の影響によるものと考えられる。 z 方向変位については傾斜計あるいは加速度計を搭載することにより、補正が可能である。そこで、この z 方向変位の影響を取り除いたものを図中の点線で示しているが、これより過大に評価されていた波高は大きく改善され、誤差 2% 程度に低減する。また水深 40 m における結果は誤差 3% 程度であり、特に補正を行なう必要もないと考えられる。つぎに図—12は skewness β_1 , kurtosis β_2 について示したものであるが、動揺の大きい水深 20 m の結果が、両者とも固定点での値との違いが見られる。これも z 方向変位の影響を取り除くと、固定点から見たものの値にほとんど一致する。skewness については z 方向変位の影響を取り除いても係留索長が長くなり動揺量が大きくなるにつれて、固定点での値よりも小さくなっていく。これは x 方向変位の影響による、波形の歪みに起因するものと考えられる。

以上の結果より、波の進行方向の動揺が、各統計量に与える影響はほとんどないことが示された。また傾斜角が大きくなる場合に、鉛直方向変位が $H_{1/3}$, skewness, kurtosis に影響を及ぼすが、この場合にも z 方向の補正を施すことにより測定精度を向上させることが可能である。

4. 結論および今後の課題

海中ブイ式波高計開発に当たり、ブイの動揺特性およびその動揺が測定波形データに及ぼす影響について、実験および数値シミュレーションにより検討した。その結果、ブイの動揺特性については、時刻歴応答解析により精度良く推定できることが示された。また波の進行方向の動揺が、計測精度に及ぼす影響については極めて少ないことが示された。また傾斜角が大きい場合には、鉛直方向変位による影響が現れるが、この場合でも簡単に補正できることが示された。

現在実機モデルを製作中であり、今後実際の現地データを用いて検討していく予定である。

今回は水面波形に対する影響のみを行ない、波向に対する影響の検討は行っていない。波向については、波の進行方向と直角方向の動揺が、方向分散性に対して影響することが考えられる。これについても今後検討していく予定である。

最後に本論文の作成にあたり、貴重な御助言をいただいた東京大学工学部磯部助教授に感謝の意を表する。

参考文献

- 榎本 亨・中村孝幸・喜田 浩 (1975): 円柱に作用する規則波による揚力について, 第 22 回海岸工学講演会論文集, pp. 525-530.
- 橋本 宏・山口 修 (1978): 海中ブイ式波浪計による波浪観測, 第 25 回海岸工学講演会論文集, pp. 60-78.
- 橋本 宏・山口 修 (1980): 表面ブイ式波浪計の実用化に関する研究, 第 25 回海岸工学講演会論文集, pp. 109-113.
- 光 易 恒・水野信二郎・本多忠夫・力石国夫 (1973): 海洋波の方向スペクトルについて, 第 20 回海岸工学講演会論文集, pp. 435-439.