

海中ブイ式波高計の計測精度に関する現地実験

大 中 晋*・堀 沢 真 人**

1. はじめに

近年、海岸港湾構造物が沖合へと展開されるにつれて、大水深域での波浪データを取得することが今後ますます重要になるものと考えられる。これまで大水深域における波浪観測はブイ式波高計によるものが一般的であった。これらには、表面でのブイの上下加速度を測定するものや（例えば光易ら, 1973; 橋本ら, 1980, 1981; 山口ら, 1991）、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）がある。しかしいずれも直接表面波形を捉えているわけではないので何らかの変換を必要とする。一方、浅海域においては直接表面波形が得られる波浪観測機器として超音波波高計がある。しかし通常海底に設置されるため、大水深への適用は計測精度や設置作業に問題があり、水深が 50 m を超えるような場合には実質的に計測が困難となる。

そこで筆者らは、大水深域においても簡便かつ高精度の波浪観測が行えることを目的とした海中ブイ式波高計を考案した。これは海中に緊張係留したブイに、着脱式の超音波波高計を搭載したものであり、係留索長を変えることにより任意の水深に適用可能である。ここで、得られる波浪データにはブイが運動することによる誤差が含まれるため、計測精度に及ぼす影響を十分に把握しておく必要がある。前回の報告（大中ら, 1991）において、水理模型実験および数値シミュレーションにより、ブイの動揺特性および計測結果に及ぼす影響についての検討を行った。その結果、ブイの動揺が得られる表面波形に与える影響は極めて小さく、本波高計開発の有用性が示された。

そこで今回、実機モデルを製作し、現地での波浪観測を実施した。本研究では、本波高計により得られた波浪データを、従来タイプの海底設置型波高計より得られる波浪データと比較することにより、計測精度の検討を行うことを目的とする。

2. 海中ブイ式波高計について

従来の大水深における波浪観測システムは、精度の問題に加えてシステムそのものも大がかりなものとなり、浅海域で一般に行われる海底設置型波高計を用いた波浪観測のように、簡単には行えない。そこで本波高計開発の基本方針として、

- ① 高精度な波高、波向観測が行えること
- ② 信頼性の高いシステムであること
- ③ 設置、交換作業が簡便であること

の 3 項目を設定した。

はじめに①を満たすために、直接表面波形を得ることのできる超音波式波高計をブイに搭載した。この点がこれまでのブイ式波高計にない大きな特徴である。ここで超音波波高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できる機構となっている。このジンバルは、広い波周期範囲でブイの傾斜運動に追従する必要がある。この点については振動台を用いた試験を実施し、想定される波周期範囲では十分な追従性能が得られることを確認している。

本システムには超音波波高計とともに、水圧センサー、ブイの運動計測用の傾斜計および方位計が搭載されている。ここで、傾斜計はブイの運動計測用に新たに考案したものである。通常の傾斜計では、水平方向加速度の影響が混入してしまい、正しい測定が行えない。そこで超音波受信部を搭載しているジンバルの、直交する 2 方向の回転角度を非接触で検出する方法を採用した。これにより、水平方向加速度の影響を排除した傾斜データが得られるとともに、非常にコンパクトな傾斜測定装置となっている。得られる 2 方向の傾斜データは、サンプリング間隔毎に方位データを用いて常に回転補正がなされ、波向観測を可能としている。またこの傾斜データは、ブイが大きく運動した場合の計測データの補正に対しても用いられることになる。

つぎに②を満足させるためには、波浪外力を直接受けないこと、および係留索に衝撃的な張力が作用させないようにすることが必要である。そこで波および流れによるカテナリー変形を生じさせないような十分な余剰浮力

* 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

を持たせることにより、常に海中で緊張係留状態を保つような係留システムとした。これにより、信頼性の高いシステムとなると同時に、ブイの運動を傾斜から推定することが可能となり、波向観測および得られる波浪データの補正が可能となる。

つぎに③を満足させるために、ブイ本体のコンパクト化を図るとともに、計測機部とフロート部を着脱式とした。これにより内蔵のメモリーパック、バッテリーの交換は、フロートが係留されている水深で浅でのダイバー作業のみとなる。また設置時においてもシンカーと係留

索およびフロート部を一体化したものを海上から吊り下ろし、その後には計測機部を取り付けられればよく、作業の効率化、単純化が図れる。

ブイ式波高計の概要および諸元を図-1および表-1に示す。

3. 現地実験について

現地実験は、神奈川県江ノ島沖の水深 28 m 地点にて行った。海中ブイ式波高計の計測精度は、従来タイプの海底設置型波高計との同時観測を行うことにより明らかにされる。そこで超音波波高計同士の干渉を防ぐために、ブイ式波高計設置位置から約 30 m 離れた地点に超音波波高計、電磁流速計および水圧センサーが一体化された海底設置型の波高波向計を設置し、海中ブイ式波高計との同時観測を行った。調査期間は 1993 年 1 月から 4 月までの約 3 ヶ月間であり、はじめの 1 ヶ月間においては係留索長を 21 m (水面下約 6 m) で、その後は 15 m (水面下約 12 m) とした。観測はブイ式波高計、海底設置型波高計とも、2 時間毎に 20 分間のデータを取得した。なおサンプリング間隔は 0.5 秒である。

4. 波浪特性について

(1) 波高、周期およびスペクトルの比較

はじめに得られた時系列波形を示す。図-2 は、高波浪が襲来した 2 月 22 日 4 時の時系列データの一部を示したものである。上段は、ブイ式および海底設置型の超音波波高計より得られた表面波形 ($(\eta)_a$) を示したものであり、中段は両者の水圧波形を表面波形に変換した波形 ($(\eta)_p$) を示している。ここで水圧から表面波への変換は、微小振幅波理論から得られる伝達関数を用いて直接フーリエ変換により行っている。また下段はこのときのブイの傾斜 (δ) を示しており、+が波の進行方向への傾斜を、-が逆行方向の傾斜を示している。この時は、有義波高が 2.7 m、最大波高が 5.6 m と、相模湾内としては比較的高波浪が得られている。またこの場合の傾斜波形の有義振幅値は $\pm 7.0^\circ$ であり、この時の係留索長が 15 m であることから、静止状態からの水平方向および鉛直方向移動量に換算すると、それぞれ ± 1.8 m および 0.11 m となる。はじめに超音波波高をみると、設置位置が異なることによる多少の違いは見られるものの、両者はほぼ同じような波形を示しており、ブイが動揺することによる影響は見られない。つぎに水圧から表面波に変換した波形は、波の谷の位置で部分的に両者に多少の違いが見られ、ブイ式波高計による水圧換算波形が、海底設置型の波形に比べてとがる傾向が見られる。傾斜が小さい場合にはこのような傾向が見られないことから、これはブイが運動することによる圧力変動が混入することが原因である

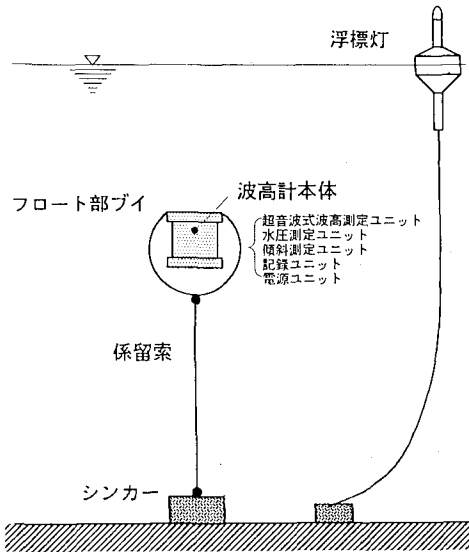


図-1 ブイ式波高計概略図

表-1 ブイ式波高計諸元

項目	諸元
フロート部	形状 球型ブイ
	直径 74 cm
	空中重量 73 kg
計測部	材質 表面: FRP 製
	中空部: ウレタンを充填
	余剰浮力 約 210 kg (計測部装着時)
計測部	空中重量 30 kg
	材質 FRP 製
	超音波式 波高測定範囲: 0~1.28 m
計測部	空中重量 波高測定分解能: 1.0 cm
	波高測定精度: $\pm 1.0\%$ /FS
	水圧測定 水圧測定範囲: 0.0~5.0 kg/cm ²
計測部	水圧測定分解能: 1.0 g/cm ²
	水圧測定精度: $\pm 1.0\%$ /FS
	運動測定 傾斜角測定範囲: $\pm 12.5^\circ$
計測部	傾斜角測定分解能: 0.1°
	傾斜角測定精度: $\pm 0.5^\circ$
	方位角測定分解能: 1.0°
計測部	方位角測定精度: $\pm 5^\circ$
	記録 記憶素子: 電気書式式紫外線消去型メモリー
	記憶容量: 8 MB
計測部	連続観測日数: 20 分/2 時間 ($\Delta t=0.5$ s): 35 日
	10 分/2 時間 ($\Delta t=0.5$ s): 70 日
	バッテリー リチウムバッテリーパック 14 V 42 Ah

と考えられる。

つぎに波高, 周期について示す。はじめに図-3は, 超音波波高計より得られるブイ式および海底設置型波高計の $H_{1/3}$, $T_{1/3}$ および $H_{\max}$, $T_{\max}$ の相関を示したものである。ここで横軸は海底設置型より得られた結果を, 縦軸はブイ式波高計より得られた結果を示している。ブイ式波高計により得られる波高は, $H_{1/3}$, $H_{\max}$ とも高波浪時においても海底設置型波高計より得られる値とほとんど一致し, ブイが運動することの影響は見られない。また $T_{1/3}$ についても両者はよく一致している。 $T_{\max}$ が両者でばらついているが, 一定の傾向が見られないことから場所的な違いによるものであると考えられる。つぎにそれぞれの波高計の水圧データおよび超音波データより得られる波高, 周期の相関を示したものが図-4である。ここで(1)は海底設置型による結果を, (2)はブイ式波高計による結果を示している。波高に関して, 全体的な相関および波高の小さいところでは, ブイ式波高計の方が

より表面に近いので, 海底設置型に比べて超音波データとの一致度は良好である。しかし高波浪になるにつれてブイ式の方は, 超音波データから得られる値よりも徐々に増加する傾向が見られる。一方, 周期についてはブイ式波高計が, 超音波データとの対応が良好である。

つぎにブイ式および海底設置型波高計の, 超音波および水圧から表面波に換算されたもののスペクトルの比較を行った。図-5(1)は, 高波浪時のうねりが卓越する場合の結果であり, (2)はうねりと風波が混在する場合の結果である。これより超音波波高計より得られるスペクトルについては, ブイ式, 海底設置型ともほとんど一致している。一方水圧センサーより換算されたスペクトルについては, (1)の場合にブイ式の結果が高周波数側で, ブイが動揺することによる圧力変動と見られるパワーの増幅が見られる。また(2)の場合は, 海底設置型は, 高周波成分の圧力変動を十分に感知できていないために, 風波成分が再現されていない。

以上の結果より, 超音波波高計により得られる結果については波形, 波高, 周期, スペクトルとも, ブイが動揺することの影響はほとんど見られず, 海底設置型波高計と同程度の精度が得られることが示された。一方水圧から得られる結果は, 全体的にはブイ式波高計による結果が, 超音波より得られる結果と良好な一致を示す。しかし高波浪でブイの傾斜が大きくなるほど, ブイが動揺することによる圧力変化による違いが生じ, 場合によっては補正が必要であると考えられる。また前回の数値シミュレーションを用いた検討では, 係留索長が長く傾斜することによる鉛直方向変位が大きい場合には, 多少の

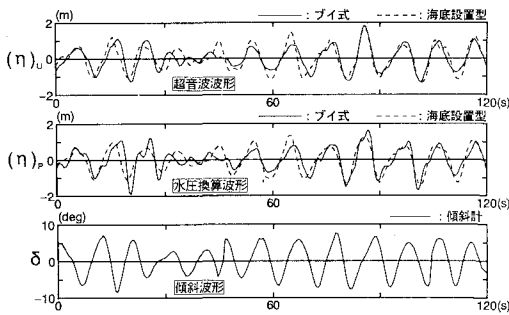


図-2 実測された時系列波形の一例

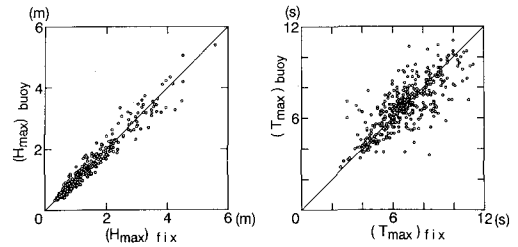
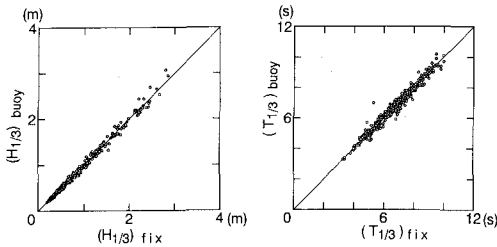
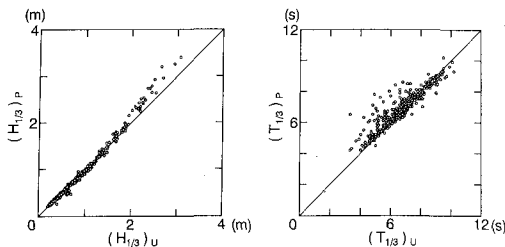
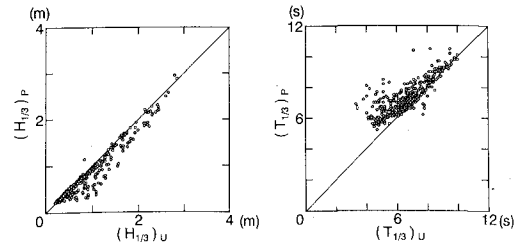


図-3 超音波波高計より得られる波高, 周期の相関



(1) ブイ式波高計による結果



(2) 海底設置型波高計による結果

図-4 超音波波高計と水圧波高計との相関

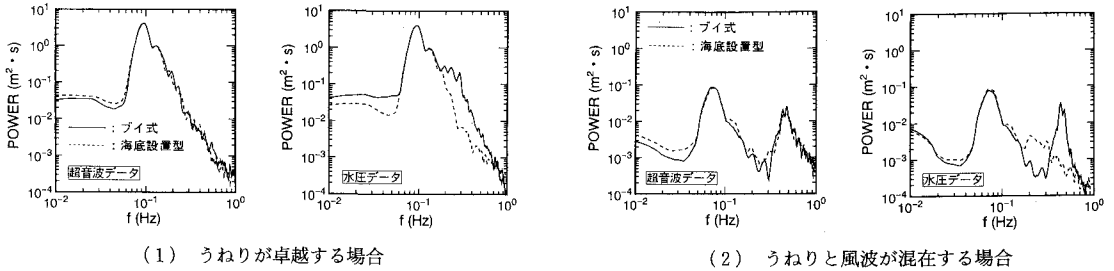


図-5 パワースペクトルの比較

影響を及ぼすことが確認されている。そこで高波浪時の傾斜が大きい数ケースについて、鉛直方向の補正を行ったものとの比較を行った結果、今回の係留索長に対しては、波高値およびスペクトルとも結果の違いはほとんど見られなかった。

(2) 波向について

つぎに波向観測結果について述べる。

ブイ式波高計については前述のように、ジンバルの傾斜角より波向を算定する。また海底設置型波高計については底面の軌道流速より波向を算定している。はじめに高波浪時における傾斜および流速の軌道楕円、およびそれらの長軸方向より得られる主波向方向を示したものが図-6である。これより傾斜の結果は、波の主方向への動揺とともにそれと直角方向の動揺も生じるために、流速計の軌道楕円より分布形状が広がっている。一方主波向については、両者ともほぼ一致した結果が得られている。このようにして得られる波向の経時変化を示したものが図-7である。これより両者はほぼ同様の変動を示しているが、両者の差が生じている期間も見られる。これらの差は、ブイの運動が小さい場合に生じると考えられる。そこで両者の波向の差と、傾斜の全振幅に対する有義値($\delta_{1/3}$)との関係を示したものが図-8である。これより傾斜角が大きくなるほど、両者のばらつきが小さくなっていることがわかる。傾斜角が小さい場合にはデータのばらつきが大きいが、このような場合には底面流速についても精度的に問題があることからどちらが真値とはいえないものである。

以上の結果より、ブイの傾斜による波向観測についても、実用上十分な精度で行えることが示された。

5. ブイの運動特性について

今後さまざまな設置水深における係留諸元の検討を行うためには、ブイの動揺特性の精度よい推定が行えることが必要となる。そこで得られた水面変動記録を用いてブイの動揺解析を行い、実測値との比較を行った。ブイに作用する流体力はモリソン式で与え、数値計算はランゲ・クッタ・ジル法による時刻歴応答解析法を用いた。

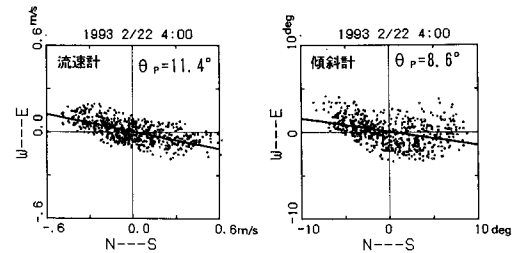


図-6 流速および傾斜の軌道楕円

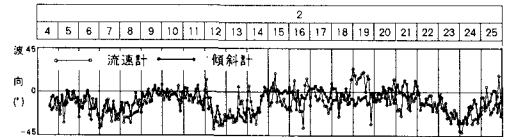


図-7 波向の経時変化の比較

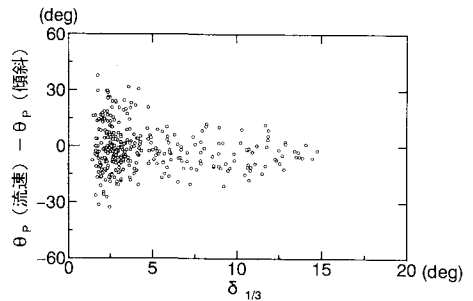


図-8 傾斜角と波向の差の関係

なお水粒子速度の時系列は、得られた水面変動より線形フィルター法を用いて計算し、加速度については計算された水粒子速度を数値微分することにより求めた。またモリソン式中に用いる流体力係数としては、先に実施している水理実験結果より得られた値として、抗力係数を0.6、質量係数を1.5、付加質量係数を0.3とした。

はじめに流速評価の妥当性を確認するために、図-9上段に示す、実測された水面変動波形を用いて、海底設置型波高計により得られた底面軌道流速について、計算値との比較を行った。その結果を示したものが図-9の中段に示す図である。これより計算値と実測値はよい一

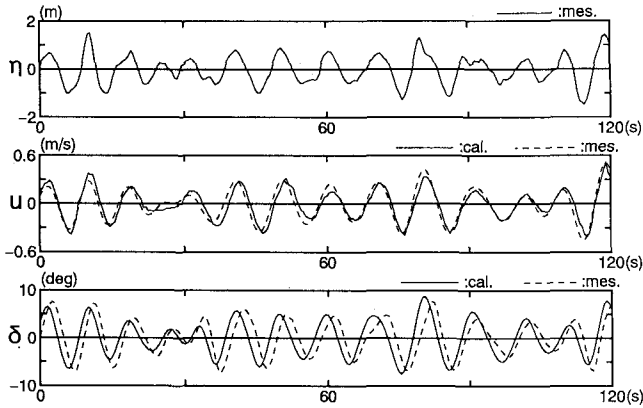


図-9 流速および動揺変動の計算値と実測値の比較

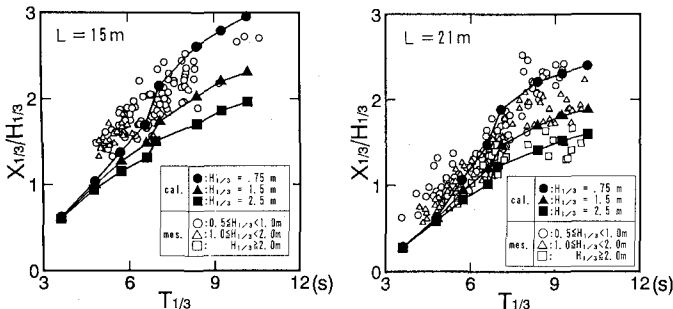


図-10 水平方向相対動揺量の計算値と実測値の比較

致を示している。つぎに計算された流速を用いて動揺解析より得られる水平方向変位から、傾斜角の変化を計算した結果を示したものが図-9下段の図である。これより位相のずれが多少みられるものの、計算値と実測値とは良好な一致を示している。

つぎに不規則波中の動揺量と波浪との関係を調べるために、さまざまな波浪諸元に対する動揺計算を行った。なお、計算に用いる入力波形としては、ブレッグシュナイダー・光易型のスペクトルをもつ不規則波を用いた。これらの動揺計算より得られる不規則波水平動揺量からその全振幅に対する有義値を計算し、周期との関係で示したものが図-10である。ここで縦軸としては、水平方向動揺量の全振幅に対する有義値 ($X_{1/3}$) を $H_{1/3}$ で無次元化した相対有義動揺量を、横軸は $T_{1/3}$ を表している。左が係留索長が15 mの結果を、右が21 mの結果である。これより、周期に対する相対動揺量の増加、および各波高に対する傾向とも、実測値と計算値とは良好な対応を示しており、実用上十分な精度で予測可能であることが

示された。

6. おわりに

超音波波高計を用いた新たな海中ブイ式波高計を開発し、現地実験を行うことにより計測精度の検討を行った。

以下に得られた結果をまとめる。

- ・海中ブイ式波高計の、超音波データより得られる波形、統計量、スペクトルについては、動揺が結果に与える影響はほとんど見られず、精度よい観測が行える。

- ・水圧センサーより得られる結果は、傾斜が大きい場合に動揺することによる影響が見られる。一方風波のように、短周期成分が卓越するような場合には、海底設置型に比べてブイ式の方が、精度よい観測が行える。

- ・傾斜による波向観測は、実用上十分な精度で行える。

- ・現地不規則波浪中のブイの動揺特性は、時刻歴応答解で十分な精度をもって予測可能である。

なお本研究を実施するにあたり、波高計の製作を担当して頂いた(有)アイオーテックニクの井戸輝彦氏、大谷明氏、また現

地観測の実施にご協力頂いた沿岸海洋調査(株)河野信二氏および東亜建設工業(株)平塚(作)湘南(工)の方々に感謝致します。

参考文献

- 大中 晋・堀沢真人 (1991): 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, 海岸工学論文集第38巻, pp. 946-950.
- 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. 60-64.
- 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27回海岸工学講演会論文集, pp. 109-113.
- 橋本 宏・山口 修 (1981): 表面ブイ式波浪計による波向観測, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 158-162.
- 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.
- 山口 修・葛西金助・藤坂安雄・難波嘉幸 (1991): 表面ブイ式波浪計の定常観測への適用, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 951-955.