

現地波浪下における緊張係留方式ブイの挙動について

谷川 勇二*・河内 隆秀**・口 田 登***・養 父 恒夫****

1. ま え が き

玄界灘（博多沖）海域における波浪観測施設は、陸地からほぼ 13.5 km 離れ、水深は約 45 m にある。このような遠距離・大水深における観測施設は、従来のような水深 10 m～20 m 程度の海域での波浪観測施設に比べ、種々の技術的課題を有している。例えば、波高計等によって観測されたデータを陸上へ送信するためには、電気信号を増幅するための増幅器や、増幅された電気信号を陸上まで送信するためのケーブルあるいは無線テレメータ、さらに、これらの機器を作動させるための電源等が必要となり、通常は、波浪観測塔などを建設して、それらの電気機器を収納する。しかし、陸地から遠く離れ、かつ、水深が非常に深い場合などは、建設資材の運搬や水中作業等が非常に困難なものとなる。

このような遠距離、大水深の場合に、従来の波浪観測塔に代わる構造形式として、水理模型実験や理論計算等を踏まえて、緊張係留方式ブイを開発し、昭和 57 年より、現地での波浪観測、ならびに、ブイ挙動把握のための計測を開始している。ブイの設置位置および構造を、図-1 および 図-2 に示す。

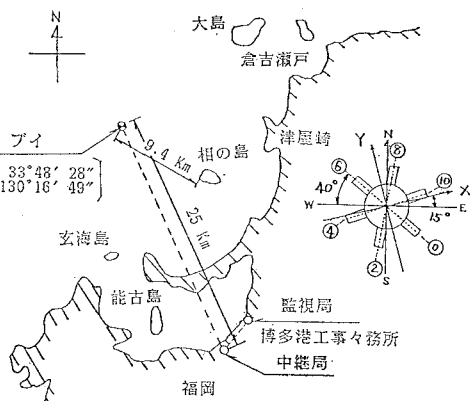


図-1 設置位置

* 正会員 工務 運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所
 ** 正会員 運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所次長
 *** 運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所次長
 **** 運輸省第四港湾建設局博多港工事事務所工事専門官

波浪観測塔のような不動の構造物に代わる緊張係留方式ブイは、激波浪作用下においても、観測データを確実に送信するための耐波安定性、すなわち、波浪等による変位が小さく、直立性および非回転性を有していることが必要である。本報は、昭和 58 年 9 月から昭和 59 年 8 月までの 1 年間に得られた海象データおよびブイ挙動計測データをもとに、大水深、大波浪下における緊張係留方式ブイの挙動と耐波安定性について報告するものである。

2. ブイ構造諸元と観測項目

(1) 構造諸元

ブイの構造は、図-2 に示すように、球体部、筒体部支持アーム、係留ワイヤー及びシンカーより成り、6 本のワイヤーによる緊張係留方式となっている。

球体部は、ブイを緊張係留するために必要な浮力を確保するため、また、波浪による動揺を小さくするために波の谷（水深約 10 m）以深に配置されている。筒体部にはブイに配備された各種電気機器が収納されており、また、観測データを送信するためのアンテナが、波峰（海面上約 27 m）以上の筒体部先端に取付けられている。6 本の係留ワイヤーは、球体部に接合された支持アームと海底に沈められたシンカーに、ユニバーサルジョイントによって連結されている。ユニバーサルジョイントはブイの任意の水平移動が可能のように、特別に開発されたものである。ブイの主要な構造諸元を表-1 に示す。

(2) 観測項目

主な観測項目を以下に挙げる。なお、観測時間は、2 時間毎の 20 分間であり、また、支持アームの設置方向は、図-1 に示す通りである。

a) 波 高

ブイ球体部に取付けられた超音波式波高計およ

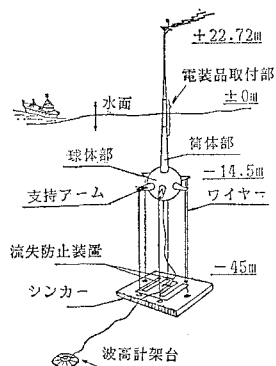


図-2 ブイ概念図

表-1 構造諸元

項 目		
観測局本体	球 体 部 直 径	8 m
	筒 体 部 {	水線面直径
		球体接合部径
	重 心 位 置	-13.0 m
	浮 心 位 置	-14.2 m
	重 量	129.1 ton
	浮 力	309.4 ton
	慣性モーメント {	x, y 軸廻
		z 軸廻
	抗 力 係 数 (x 方向) C_D	0.62
係留索	平 均 張 力	30.05 ton
	軸 剛 性	1.6×10^8 ton
	係 留 点 高 さ	-13.935 m
	係 留 点 腕 長	6.75 m
	索 長	29.69 m
水 深		45.0 m

び海底に設置された水圧式波高計によって計測される。

b) 速 度

ブイに取付けられた加速度計によって、水平方向2成分(X, Y)の加速度が計測され、データ収録の際に時間積分され、速度として記録される。

c) 係留ワイヤー張力

ブイの動揺にもとづく各係留ワイヤー張力は、係留ワイヤー下端に取付けられたロードセルによって計測される。各ワイヤーは、図-1に示すように、⑨~⑬の番号を付して区別している。

d) 水 圧

ブイ筒体部(水深約 3.7 m)に取付けられた水圧計により計測される。これは、後述するように、波の方向スペクトルを推定する際に、波高および速度と組み合わせて使用される。

3. 実 測 挙 動

一般に浮体が波浪、風および流れの作用を受けると、並進変位3成分と回転変位3成分の6自由度の運動が起こり、それぞれの運動に対しては、例えば、サージング(前後揺)、ピッチング(縦揺)等の名称が慣例として用いられている。

しかし、本報告の緊張係留方式ブイは、軸対称であることから、前後と左右の運動特性に区別はなく、また、緊張係留方式であるため、上下の運動は、ブイの水平変位による沈み込みと、係留ワイヤーの伸び縮みのみである。水平軸回りの回転運動は、全ての係留ワイヤーが緊張状態に保たれている限り、ワイヤーの伸び縮みによる回転だけであり、大きな回転運動が起こるためには、半

数以上の係留ワイヤーがたるんだ状態(張力はゼロ)にならなければならない、この場合、ブイは直立性を保つことができず、また、非常に危険な状態となる。鉛直軸回りの回転運動に関しては、軸対称体であることから、波浪等の外力による回転モーメントは、非常に小さいと考えられる。

以上のように、ブイの挙動は、水平方向変位と係留ワイヤー張力により代表されることになり、次節の理論計算値との比較を考慮して、速度および係留ワイヤー張力の実測データは、以下のように処理した。

(1) 速 度

速度の時刻歴データを時間積分によって変位の時刻歴に変換し、不規則変動量としての変位の統計量を、スペクトル解析(BT法)により求めた。

(2) 係留ワイヤー張力

変位と同様、BT法によってスペクトル解析し、張力変動のスペクトル密度関数および統計量を求めた。

4. 動 揺 計 算

緊張係留方式ブイの設計にあたり、現地波浪を想定した動揺計算を行っており、その際、ブイ本体のモデル化や計算上の諸係数は、水理模型実験の結果によって定めている。そこで、これまでの挙動推定法の検証のため、実測波浪スペクトルに対する動揺計算を行い、変位応答および張力変動の計算値と実測値を、それぞれ、比較検討した。

動揺計算は、以下の3つの部分から構成されている。

(1) 実測波浪のスペクトル解析

波の方向スペクトルは、一般に次のように書き表わされる¹⁾。

$$S_{\eta}(f, \theta) = S_{\eta}(f) \cdot G(f, \theta) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $S_{\eta}(f, \theta)$ は方向スペクトル、 $S_{\eta}(f)$ は周波数スペクトル、 $G(f, \theta)$ は方向分布関数、 f は波の周波数、 θ は波の平均進行方向(または主方向)と成分波の進行方向とのなす角である。

方向スペクトルの算定方法には、波高計群方式、波浪ブイ方式、2成分流速計方式などがあるが¹⁾、本報では、磯部ら²⁾の提案によるEMLMによって方向分布関数を算定した。EMLMとは、波高計アレイだけでなく、流速計や水面傾斜等の混ざったアレイから得られる記録を用いて方向スペクトルを精度よく推定できるように、MLM(最尤法)を拡張した推定であり、本報では、波高以外のデータとして速度(X, Y)および水圧を用いて方向スペクトルを算定した。

(2) 流体力の算定

ブイに作用する流体力は、ポテンシャル理論にもとづくハイブリッド型有限要素法により算出した。ただし、

ブイの水平方向揺れの固有周期 (14 秒程度) が, 波エネルギーの卓越する周期 (3 秒~12 秒) に比較的近いため, 減衰力の評価として, 抗力項 (流体粒子と物体の相対速度の自乗に比例する項) を付加している。

ブイ本体は, 次のように軸対称体へモデル化した。まず, 球体部および筒体部はそのまま球体と円筒体の接続した形状にする。支持アーム部は三角形断面を持つリング体として球体部外周に取付ける。この際, リング体の排水量と上下方向投影面積が支持アームのそれらに等しくなるようにモデル化した。(図-3 参照) また, このような軸対称体の場合, 三次元問題を二次元問題に置き換えることができ, 計算は非常に楽になる。計算における有限要素分割は, 図-4 に示す通りである。

(3) 不規則波中応答計算

短期統計予測の手法を用いて, エネルギースペクトル法により, ブイの不規則波中の応答計算を行ない, 応答スペクトルおよび応答の統計量を算定した。

エネルギースペクトル法により, 応答スペクトル $S_u(f)$ は次式のように表わされる。

$$S_u(f) = \int_0^{2\pi} |A(f, \theta)|^2 \cdot S_\eta(f, \theta) d\theta \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに, $A(f, \theta)$ は応答関数であり, 規則波中での運動方程式から概略得られる。概略というのは, 後述するように, 応答関数の重ね合わせによって得られる不規則応答全体から得られる応答の統計量によって, 運動方程式に含まれる非線形項の影響を補正する必要があるからである。

規則波中での運動方程式は次のように表現される。

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = F_G \cdot \cos(2\pi ft) + F_S \cdot \sin(2\pi ft) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに, $U, \dot{U}, \ddot{U}$ はそれぞれ, 重心の変位ベクトル, 速度ベクトル, 加速度ベクトルである。 M は質量係数行列, C は減衰係数行列, K は復原力係数行列であり, また F_G, F_S は, とともに波強制力である。

本解析では, 粘性減衰の影響は便宜的に次のようにして取り入れた。粘性減衰が運動に有意な影響を与えるのは, 同調周波数近傍であるので, 水平方向の運動に対してのみ

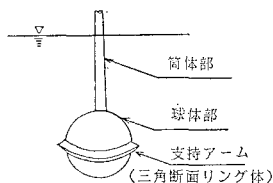


図-3 波力計算モデル

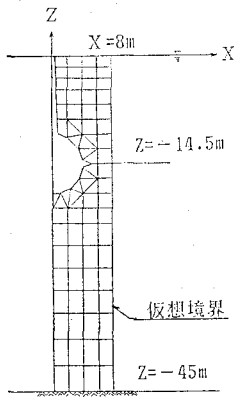


図-4 有限要素分割

考慮することにした。運動の主方向の抗力 F_D は,

$$F_D \approx \frac{1}{2} C_D \rho A_D \cdot |\dot{v} - \dot{u}| \cdot (\dot{v} - \dot{u}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

と書ける。ここで $\dot{u}$ は重心の運動速度, $\dot{v}$ は流体粒子の速度, C_D は抗力係数, ρ は流体密度, A_D は物体 (ここではブイ本体) の投影面積である。不規則応答の場合に対して Penzien ら³⁾は, 非線形抗力と線形化抗力との自乗平均誤差を最小にする条件から, 等価線形化抗力係数を導いているが, それと同様の考え方により, 式 (4) は,

$$F'_D \approx \frac{1}{2} \sqrt{\frac{8}{\pi}} C_D \rho A_D \sigma \cdot (\dot{v} - \dot{u}) \quad \dots\dots\dots (5)$$

と線形化される。ここで, σ は, 流体粒子と物体の相対速度の標準偏差で, 物体速度の標準偏差 σ_u と流体粒子速度の標準偏差 σ_v を用いて

$$\sigma^2 = \sigma_u^2 + \sigma_v^2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

と表わされるものである。なお, 式 (5) のうち, 流体粒子速度 $\dot{v}$ に比例する項は, 波強制力の項へ組込まれる。

式 (3) の解は, 定数応答を仮定して次式のように得られる。

$$U = U_G \cdot \cos(2\pi ft) + U_S \cdot \sin(2\pi ft) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\begin{pmatrix} U_G \\ U_S \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} K - (2\pi ft)^2 M & 2\pi ft C \\ -2\pi ft C & K - (2\pi ft)^2 M \end{bmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} F_G \\ F_S \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (8)$$

結局, ブイ本体の 6 自由度の運動は, 式 (8) の 12 元 1 次方程式を解くことにより得られることになる。ただし, 式 (5) における σ は運動の結果生ずるものなので, 反復計算により収束させることになる。

また, 係留ワイヤーの張力変動は, ブイ本体重心の変位応答から, 各係留ワイヤー上端部の変位応答を求めて計算することができる。

さて, 以上の式 (2)~(8) により, 応答スペクトルが求まったならば, 確率的手法⁴⁾により, 応答の統計量が算定される。すなわち,

$$U_{1/3} = 2.002 \sqrt{m_0} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$T_z = \sqrt{m_0 / m_2} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$U_{\max} = \sqrt{m_0} \left\{ \sqrt{2 \ln \left(\frac{T_0}{T_z} \right)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln \left(\frac{T_0}{T_z} \right)}} \right\} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$m_0 = \int_0^\infty S_u(f) df \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$m_2 = \int_0^\infty f^2 \cdot S_u(f) df \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここに, $U_{1/3}$ は応答の有義値, T_z はゼロアップクロス周期 (秒), $U_{\max}$ は時間 T_0 (秒) 中の応答最大値である。

4. 結果と考察

(1) 波スペクトル

図-5 に波のスペクトル解析結果(周波数スペクトル)の例を示す。動揺計算に用いたのは方向スペクトルであるが、方向スペクトルの表示には多大な紙面を要するため割愛した。ただし、波の主方向は、E55°N である。

さて、図-5 によれば、このときのピーク周波数は、0.117 Hz (周期 8.5 秒) 程度で、ゼロアップクロス周期 $T_{1/8}=8.7$ 秒にほぼ等しく、また、スペクトル形状からも、波のエネルギーがピーク周波数付近に集中していることが分かる。

今回の解析は、1年間の観測データのうち海象の荒い期間のデータ 51 ケースを選定して行なったものであるが、波スペクトルは、図-5 に示したようなピークが 1 つの場合ばかりでなく、2, 3 のピークを持つものもあった。また、波主方向について言えば、北～東の方向から進入して来る場合が多かった。これは、地形的に特有な現象であろうと考えられる。(図-1 参照)

(2) 波主方向変位

図-6 に波主方向変位のスペクトル解析結果例を示す。同図より実測値と計算値を比較すると、ピーク周波数は、ほぼ等しく 0.09 Hz (周期 11.1 秒) でありスペク

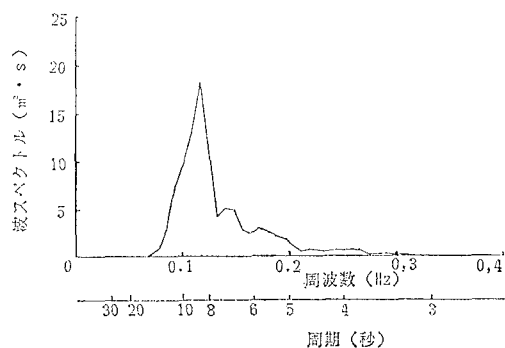


図-5 波スペクトル

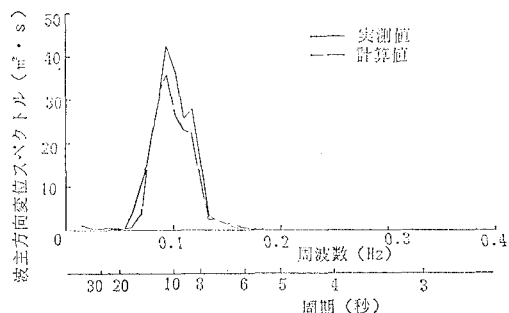


図-6 波主方向変位スペクトル

トルのピーク値について言えば、計算値の方がやや小さい目であるが、スペクトルが応答(ここでは変位)の2乗で表わされることを考慮すれば、計算値と実測値とは、ほぼ等しいと見て良いだろう。

図-7 は、今回解析した 51 ケースについて、波主方向変位の有義値をプロットしたものである。同図によれば計算値は、全般的に見て実測値よりもやや小さいが、おおむね一致していると言えよう。ブイの実変位という面から見ればほとんどが 4~5 m 以下であり、係留ワイヤー長 (29.69 m) によりワイヤーの振れ角を計算すれば 8~10° 以下、ブイの沈み込み(垂直変位)は 30~40 cm 以下となる。ただし、51 ケースのうちの最大変位(実測最大値)は 11.6 m (有義値で 6.55 m) でであり、振れ角 23°, 垂直変位 2.4 m 程度である。

(3) 係留ワイヤー張力

図-8 に、係留ワイヤー⑥(図-1 参照)における張力変動のスペクトル解析結果例を、また、図-9 には、同ワイヤー張力の実測値と計算値(ともに有義値)との相関を示す。

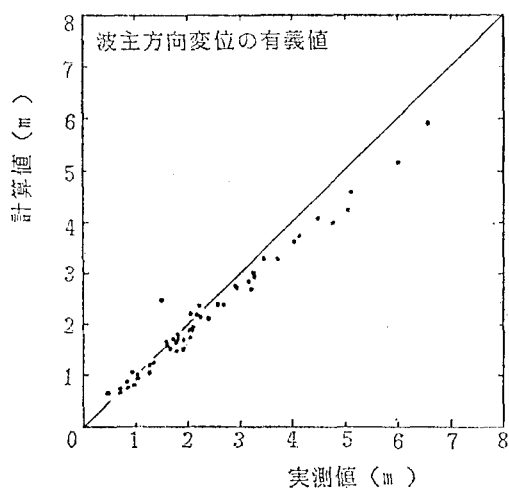


図-7 波主方向変位の実測値と計算値

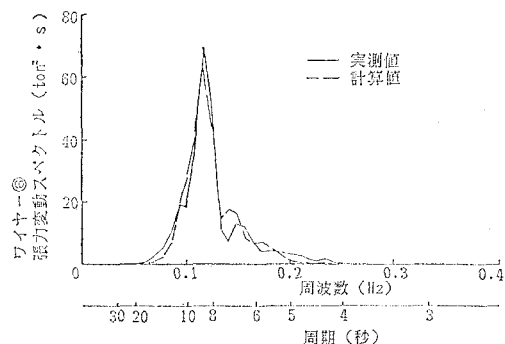


図-8 張力変動スペクトル

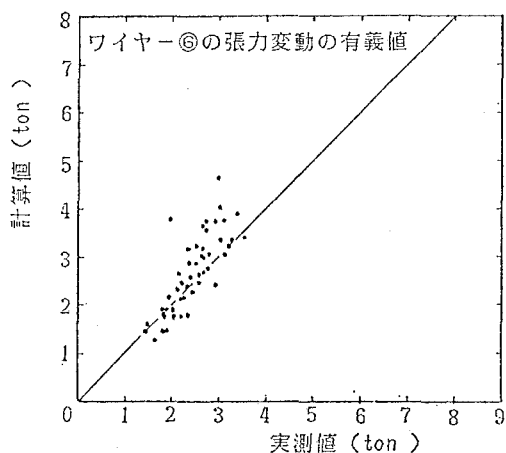


図-9 張力変動の実測値と計算値

図-8 に示した例では、実測値と計算値とは非常に良く一致していると言える。しかし、図-7 と 図-9 を見て分るように、波主方向変位の実測値と計算値とが概ね一致しているのに対して、張力変動における両者の差は変位の差に比べてやや大きく、また、変位の場合計算値の方が小さ目であるのに対し、張力の場合は、どちらかと言えば計算値の方が大きくなる傾向である。しかし、平均張力が約 30 t であるのに対し、張力変動は、有義値で 3~4 t 以下と小さく、計測における誤差を考えれば、ほぼ妥当なものと言えよう。

なお、今回解析した 51 ケースのうち、実測張力変動の最大値（ただし、ワイヤー⑥）は、6.56 t（有義値で

は 3.52 t）であり、あまり大きくないことが分かった。また、6 本の係留ワイヤーは、全ケースにおいて緊張状態にあり、したがって、係留ワイヤーがゆるんで、水平軸回りの大きな回転運動は起きていないものと思われる。

5. あとがき

本報は、昭和 58 年 9 月から昭和 59 年 8 月までの 1 年間に得られた実測データをもとに、現地波浪下における緊張係留方式ブイの挙動を解析したものであり、主要な結論は以下のようである。

(1) 変位応答および張力変動の実測値から、両者ともあまり大きくはないこと、また、張力のみに関しては常に緊張状態が保たれ、衝撃力が作用するような不安定な状態にはなっていないことが確認された。

(2) 変位応答および張力変動の実測値と計算値は、おおむね一致しており、現地計測での精度を考慮すれば、ブイのモデル化や動揺計算手法は、ほぼ妥当なものであると言えよう。

参 考 文 献

- 1) 合田良實：港湾構造物の耐波設計，鹿島出版会，237 p.，1977.
- 2) 磯部雅彦・近藤浩右・堀川清司：方向スペクトルの推定における MLM の拡張，第 31 回海岸工学講演会論文集，pp. 173~177，1984.
- 3) Malhotra, A. K. and J. Penzien: Nondeterministic analysis of offshore structures, EM 6, ASCE, 1970.
- 4) 平山次清：海洋波の統計的性質，日本造船学会誌，第 609 号，1980.