

厚円盤型ブイの波浪中応答特性

合田良実*・鈴木康正**・蜂須賀和吉***

1. 緒 言

現地で波浪を測定するための機器としては、超音波式波高計、水圧式波高計などが主として使われている。これらの波高計は、一般に浅海域における波浪観測を行う際に用いられるもので、水深の大きい深海域では、さまざまな理由から適用しにくい面を持っている。しかし、深海域における波浪の性質を知ることもやはり重要なことであり、以前よりその測定が望まれていた。

深海域用の波高計としては、水面変動に忠実に追従するブイなどの運動から波浪を測定する方式が考えられる。この方式は、ブイの応答性能が良く、しかもブイの運動を完全に検出することができれば、比較的簡便なものである。本文は、厚円盤型(図-1 参照)のブイ式波高計の、波浪中における応答特性について調べたものである。

2. 実験方法

2.1 実験の目的

ブイを波高計として用いる場合には、応答性能すなわちブイが水面変動に完全に追従することが重要である。ブイは一般に、周期の短い波に対して応答性能が悪いので、現地で測定の対象とする波の周期帯において、波高とブイの上下揺動振幅との比が1に近い値であるかどうかを確認しておく必要がある。

また、係留索に作用する張力は、波、風、潮流等の外的条件のほかに、ブイおよび係留索の諸元が関係し、現象が非常に複雑であるため、現在のところ理論的に解析できるまでには至っていない。特に、不規則波中ではブイが長周期の水平動揺をするため、係留索は緊張と弛緩を繰返すことになり、弛緩状態で大きな波が当たると、係留索には衝撃的な力が作用する。本実験では、波浪だけを外的条件とし、係留索の安全性についても実験的検討を加えた。

2.2 実験装置

実験に用いた水路は、運輸省港湾技術研究所大型水工実験場内にある 40 m 不規則波造波水路である。この水路は、幅および高さ 1.5 m、長さ 40 m で水路床は水平であり、ピストン型造波機が設置されている。造波機駆動用信号は、規則波では低周波発振器による正弦波形、不規則波では、Bretschneider 型の周波数スペクトルを待つ不規則信号を用いた。

測定器として、水位変動は容量式波高計、ブイの運動は X-Y アナライザーと呼ばれる装置を用いた。また、索張力の測定には鋼製の張力計を使用した。これは「I」型をしており、両端に張力が加わったときに生ずる腹部の曲げモーメントを歪ゲージで検出し、張力に換算するものである。

一方、記録器としては、ペンオシログラフおよびデータレコーダーを用いた。

2.3 模 型

今回の実験の対象としたブイは、図-1 に示した厚円盤型ブイで、その諸元は表-1 のとおりである。模型縮尺は 1/75 および 1/30 の二種類とした。ただし、実験水深はいずれの模型に対しても 1 m としたため、現地水深は 1/75 模型では 75 m、1/30 模型では 30 m である。なお、模型ブイの上部には、X-Y アナライザーでブイの運動を測定するための豆電球が取付けてある。

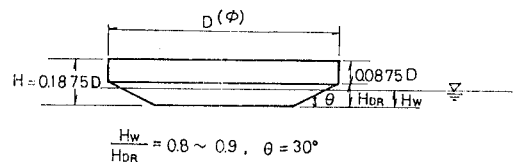


図-1 厚円盤型ブイ

表-1 厚円盤型ブイの諸元

項 目	諸 元	項 目	諸 元
直 径 (D)	10 m	浮 心 (KB)	0.5 m
吃 水 (Hw)	0.9 m	重 心 (G)	1.14 m
厚 さ (H)	1.875 m	傾 心 (GM)	8.1 m
カ ッ ト 角 (θ)	30°	慣性モーメント (I)	約 406 t・m ²
排 水 量 (W)	45.5 t	横 揺 周 期 (T)	約 3 sec

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 海洋水理部長

** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 海洋水理部

*** 正会員 運輸省港湾技術研究所 海洋水理部

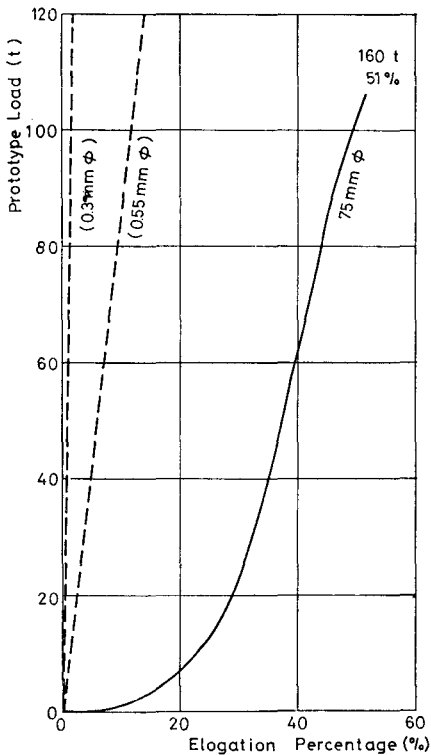


図-2 係留ロープの伸び特性

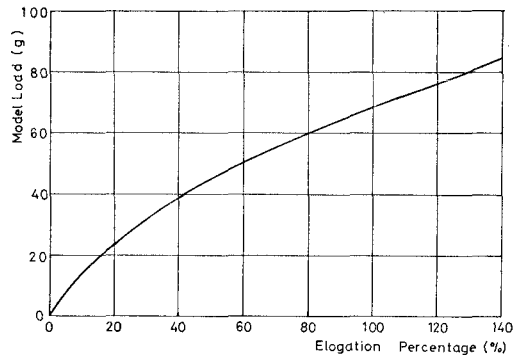


図-3 ゴムパネの伸び特性

2.4 測定方法

実験には、規則波と不規則波を用いた。まず規則波では、周期を $0.67 \sim 2.5$ sec の範囲で約 20 種類変化させ、ブイの運動を測定した。予備実験の結果、ブイの運動振幅は入射波高に比例することが確認できたので、各周期について波高は一種類とした。その際、波形勾配がおおよそ 4% 程度になるように波高を定めたが、波高の上限値は 10 cm とした。なお、ブイによって乱されない入射波を測定するために、波高の測定地点は、ブイの位置より約 70 cm 造波板側とした。

また、より実際の海の波に近い不規則波中でのブイの応答特性を見るため、現地の有義波周期で約 8 sec および 12 sec の砕波しない不規則波を起こし、ブイの運動を測定した。また、巻波型の砕波が起こるようになるまで波高を高め、係留索に作用する張力についても検討した。

3. 実験結果と考察

3.1 ブイの応答性能

(1) 規則波中での応答特性

X-Y アナライザーによるブイの周波数応答特性の測定結果を示すと、図-4 のようになる。図中の η , ξ はそれぞれ上下揺、水平揺の両振幅、 H は波高、 D はブイの直径、 L は波長、 T は現地に換算した周期である。

ブイによって波高を測定しようとする場合には、ブイの上下運動の応答性能が重要である。また、2.1 節でも述べたように、応答特性で特に問題となるのは短周期の波についてであり、実験結果からも、短周期側で η/H が小さくなり、応答性能が落ちていることが判る。現地のブイでは、おおよそ $5 \sim 20$ sec の周期の波を測定の対象としているものと考え、1/75 模型では $D/L \cong 0.02 \sim 0.3$ 、1/30 模型では $D/L \cong 0.03 \sim 0.25$ となる。1/30 模型の実験結果を見ると、この周期帯では波高に対しほぼ $\pm 10\%$ の範囲内で応答しており、良好な追従性能を持っていることが判る。一方 1/75 模型では、 $D/L \cong 0.1$ す

現地で使用するブイの係留索は、外径 80 mm ϕ 、単位重量 3.95 kg/m のナイロンエイトロープを想定した。しかし、80 mm ϕ のロープの荷重-伸び曲線が得られなかったため、75 mm ϕ の伸び特性を示すと図-2 の実線のようになる。模型の係留索では、外径および単位重量に対する縮尺率を同時に満足させることは困難である。現象的には、係留索に作用する流体力はオーダーが小さいと考えられるので、直径相似よりも重量相似を保つようにし、1/75 模型には外径 0.3 mm、1/30 模型には外径 0.55 mm のナイロン製釣糸を使用した。これらの荷重-伸び曲線は図-2 の破線のようになった。現地のロープで荷重が小さいときに伸びが大きいのは、何本かのナイロンロープを纏ってあるため、荷重が小さいうちは纏りの緩い部分が締まり、それが伸びとして現われているためであろうと考えられる。図-2 から、実験に用いたナイロン糸は、現地の係留ロープに比べて伸びにくいと言える。そこで、係留索に弾性を与えるために、係留索の上端にゴムパネを挿入した実験も行なった。ゴムパネの伸び特性は図-3 に示すとおりである。係留索の全長は 2 m とし、ゴムパネを接続するときには、1/75 模型ではゴムの長さ 26 cm、1/30 模型では 10 cm とした（ゴムパネを挿入した場合には、係留索の相似則は必ずしも成立しない）。

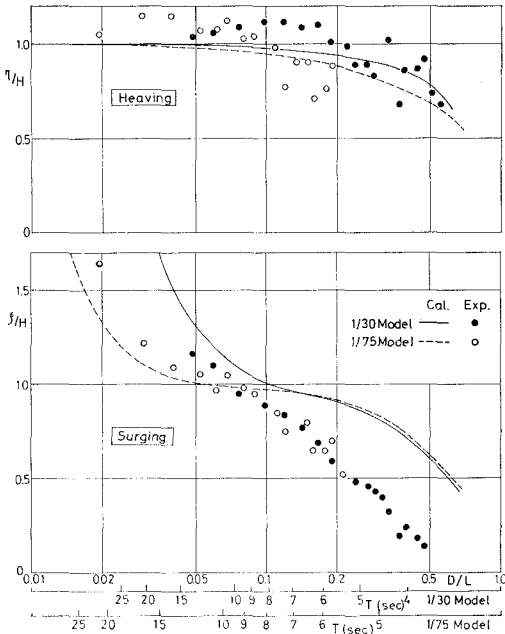


図-4 規則波中の応答特性

なわち $T=8 \text{ sec}$ 付近で既に追従性が悪くなっており、1/30 模型よりも応答性が悪い。この原因としては、1/75 模型は縮尺が小さいため模型の精度などに問題がある可能性があること、係留索がブイの運動に影響を及ぼしていることなどが考えられるが、詳細は不明である。図-4 には、上下揺と同時に測定した水平揺の測定結果も示してあるが、水平揺に関しては 1/75 模型と 1/30 模型の差はほとんど見られず、周期が短くなるにしたがって単調に減少することが判る。

なお、図-4 中の曲線は、底部の切欠きのない直円盤の応答を、直立円柱浮体に対する井島の計算法¹⁾を用いて求めた結果である。図-1 のような厚円盤型ブイに対する値ではないが、測定結果と傾向はほぼ一致している。また理論値を見ると判るように、長周期の波に対しては無次元上下揺振幅 η/H は 1.0 となる。実験結果での上下に変動しているのは、実験では長周期のきれいな正弦波を起こしにくいこと、また X-Y アナライザーでブイの運動を測定するために取付けた豆電球の位置がブイの重心からずれているため、上下運動の測定値に回転運動の影響が入ってきているためであろうと考えられる。

(2) 不規則波中での応答特性

実際の海の波は不規則な波であり、ブイが不規則な水位変動に対しても充分な追従性があるのか、またブイの不規則波中での運動はどのような特性を持っているのかを調べておくことも重要である。また、今回用いた実験水路での規則波の造波能力は $T \approx 0.67 \sim 2.5 \text{ sec}$ であり、

これ以外の周期ではきれいな正弦波は起こしにくい。そのため、広範囲にわたるブイの運動の周波数応答は規則波では測定することがむずかしいが、不規則波にはさまざまな周期の波が含まれているので、不規則波中でのブイの運動を測定すれば、ある程度それを補なうことができる。

図-5 は、水位変動およびブイの上下揺変位をデータレコーダーに記録し、電子計算機によってそれぞれのエネルギースペクトルを求めたものの一例である。実線が水位変動、破線がブイの上下変位のスペクトルである。また、応答のスペクトル $S_f(f)$ は、応答関数 $H(f)$ および水位変動のエネルギースペクトル $S_w(f)$ から次式によって計算することでもできる。

$$S_f(f) = [H(f)]^2 S_w(f) \dots\dots\dots (1)$$

図中の一点鎖線は、 $H(f)$ として 図-4 の理論値、 $S_w(f)$ として実測値を用いて式から求めた値である。なお、図の横軸の f は実験における周波数、 T は現地に換算した周期を表わしている。

図-5 で水位変動とブイの上下運動のスペクトルとを比べてみると、全般的にブイの上下変位のスペクトルは水位変動のスペクトルよりも小さ目であるが、両者のピークの位置は一致し、またスペクトル形も良く似ていることから、不規則波に対してもブイが追従性を持っていることが判る。ただし、現地の周期 5 sec 前後以下の波では、規則波中の応答特性から予想されるように、水位変動とブイの鉛直変位のスペクトルの差が、他の周期帯よりは大きくなっている。

また、ブイの応答スペクトルの計算値と測定値を比べてみると、計算値はほぼ良好な結果を与えることが判る。両者の差では $T_{1/3} \approx 12 \text{ sec}$ の波 (図-5, (1)) に対して、スペクトルのピーク付近で応答スペクトルの測定値が計算値よりも明らかに小さくなっていることが問題であろう。 $T_{1/3} \approx 8 \text{ sec}$ (図-5, (2)) の波ではこのような現象は起きておらず、測定上の誤差によるものとも考えられるが、はっきりとした原因は不明である。

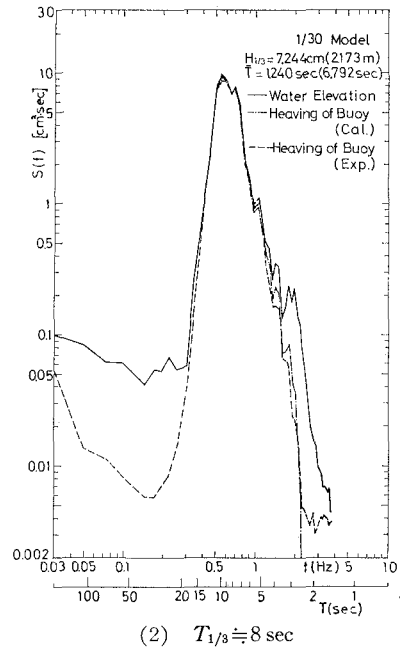
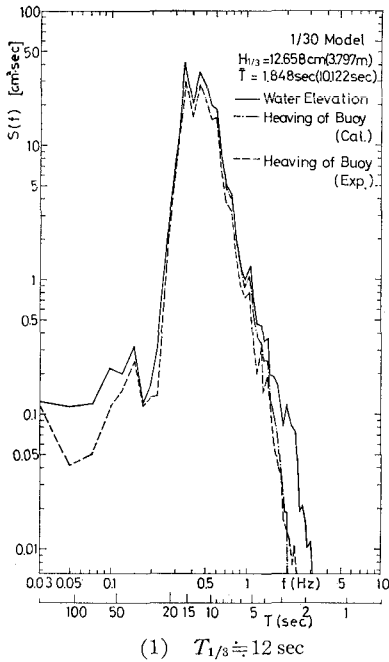
表-2 は、不規則波中の応答から、有義波高と平均周期を求めた結果である。Z-C 法とはゼロアップクロス法により定義された波を基にしたもの、E 法とは、次式を用いてスペクトルエネルギーから求めた値である。

$$H_{1/3} = 4.004 \sqrt{m_0}, \quad \bar{T} = \sqrt{m_0/m_2} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、

$$m_n = \int_0^\infty f^n S(f) df, \quad S(f): \text{スペクトルエネルギー}$$

である。表-2 から、ブイの上下揺から求めた値は、水位変動に比べて有義波高は小さ目、平均周期は長目となっているが、おおむね良好な結果であることが判る。これは、図-5 でブイの応答スペクトルが水位変動のスペ



図—5 不規則波中の応答特性 (1/30 模型)

表—2 不規則波中のブイの応答

		有義波高 (cm)		平均周期 (sec)	
		Z-C 法	E 法	Z-C 法	E 法
水位変動		12.66	12.87	1.85	1.75
上下揺	測定値	10.85	11.34	1.84	1.85
	計算値	—	11.92	—	1.76
水位変動		7.24	7.43	1.24	1.22
上下揺	測定値	6.67	7.01	1.34	1.38
	計算値	—	7.05	—	1.31

クトルよりも全般的に小さく、特に短周期側でその差が大きいことが原因である。また、ゼロアップクロス法とエネルギー法による差は、今回の実験結果から見る限りではそれほど大きくはないことも判る。

3.2 係留索張力

係留索にとって最も危険な状態は、係留索が緩んでいるときに大きな波によってブイが急激に移動し、係留索に衝撃的な力が作用する場合であろうと考えられる。このような現象は規則波中では起こりにくく、また理論解析も困難であるので、不規則波中の実験によって検討した。

不規則波は、一波ごとの波高は不規則に変動するが、比較的大きな波高の波が何波が続くと、次には小さな波が連続してやってくるというように、波高は時間的にゆっくりとした変動を繰返している。波高の大きな波が続くとブイは徐々に岸側に寄せられ、やがて係留索によっ

表—3 不規則波中の係留力

模 型	係留索	張 力 (t)		波 浪 条 件	
		$T_{\max}$	T_{next}	$H_{1/3}(\text{m})$	$T_{1/3}(\text{sec})$
1/75 模型	バネなし	155.1	143.9	17.9	13.8
	バネあり	30.2	28.5		
1/30 模型	バネなし	22.9	22.7	7.2	12.4
	バネあり	3.1	3.0		

て沖側に引き戻される。このようにして、係留索が少し緩んだ状態で大きな波高の波が来襲したときに衝撃的な索張力が発生する場合が多い。特に、ブイが砕波の上に乗って運ばれ、大きい速度で移動するときに危険である。

実験に用いた不規則波は、1/75 模型に対しては $H_{1/3} = 23.9 \text{ cm}$ (現地で 17.9 m), $T_{1/3} = 1.60 \text{ sec}$ (13.8 sec), 1/30 模型に対しては $H_{1/3} = 25.9 \text{ cm}$ (7.2 m), $T_{1/3} = 2.26 \text{ sec}$ (12.4 sec) であり、波群中の波高の大きい波では巻波形の砕波が起きていた。このような不規則波中にブイを係留し、係留力を測定して最大および二番目に大きい張力を求めたのが表—3 である。表中の $T_{\max}$ は最大張力、 T_{next} は二番目に大きい張力である。また、“バネなし”とは係留索としてナイロン系のみを使用した場合、“バネあり”とはナイロン系にゴムバネを接続して係留索とした場合である。これらの結果から、係留索の弾性がほとんどないナイロン系の場合には、 $H_{1/3} = 17.9 \text{ cm}$ の波で 155 t, $H_{1/3} = 7.2 \text{ m}$ の波でも 23 t という大きな張力が発生していることが判る。一方、ゴムバネを接続した

弾性のある場合には、最大張力は弾性が強い場合の13～19%に減少する。これは、係留索の弾性によってエネルギーが吸収されたために索張力が低減したものである。現地で係留索として使用するナイロンエイトロープは、図-2のような伸び特性を持っている。このような係留ロープにどの程度の張力が作用するかは、次のようにして推定することができる。

ブイの運動が係留索によって瞬間的に止められると、ブイの運動量が0になる代わりに、係留索には力積として衝撃的な力が作用する。空中において、自由落下試験を実施したところ、次のような関係式が成立することが判った。

$$(W+W_a)v/g=\int_0^{\tau} Fdt \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 W : ブイの重量, W_a : 付加重量, v : ブイの移動速度, g : 重力加速度, F : 索張力, τ : 張力のかかり初めからピークまでの時間, t : 時間, である。ブイが水中で運動をすると周囲の水も同時に運動し、あたかもブイの重量が増加したかのような現象を示すが、それを表わしたのが W_a である。次にブイの移動速度 v は、表-3で最大張力と二番目に大きい張力とがほぼ等しいことから、大きい索張力を発生させるときにはほぼ一定であると予想される。このことから、 v は砕波の波頂の水粒子速度すなわち波の位相速度と関係があるものと推定される。今回の実験においては、軽量の1/75模型が砕波の前面に乗せられて移動しているものと考えられる。最大張力が最大波高のときに発生したものとすると、統計計算結果から最大波の周期が1.49 secであったので、位相速度すなわちブイの移動速度 v は222.3 cm/secとなる。一方、索張力の記録から、式(3)の右辺の力積を求めたところ、61.1 gr·secであった。1/75模型では $W=107$ gr であるので、結局、付加重量 $W_a=162$ gr となる。 $W. D. Kim^{2)}$ は、水面に浮かび上下方向に振動する扁球の付加質量係数 $C_M=W_a/\frac{4}{3}\pi w_0 r^3$ (w_0 : 流体の単位体積重量, r : 扁球の長径の1/2)を求めているが、それによれば周期が短くなると C_M は0.24に近くなる。今回の結果から C_M を求めると0.13となりかなり小さいが、これは Kim が完全に上下方向の振動を取扱っているのに対し、実験ではブイの底面が運動方向に対し斜めになっていることなどの影響によるものと考えられる。

以上のようにして求められた付加重量が、そのまま現地にも適用できるものと仮定して、現地のナイロンロープの破断に対する安全性について検討してみる。ロープの弾性を考慮するため、力積ではなくエネルギー的な取扱いをする。ブイとその付加重量が持つ運動エネルギーは、

$$E_K=(W+W_a)v^2/2g \quad \dots\dots\dots (4)$$

である。実験における値を現地に換算すれば、 $W=45.5$ t, $W_a=68.3$ t, $v=19.3$ m/sec となる。一方、ロープに貯えられる歪エネルギーは次式で求まる。

$$E_S=\int_0^a Fxdx \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 F : 張力, a : ブイが停止するまでの伸び, x : 伸び, である。図-2に示した伸び特性を持つ75 mmφのナイロンロープ200 mによって係留するものとし、図-2から $E_K=E_S$ となるような荷重および伸び率を求めると、索張力88.1 t, 伸び率46.5%となる。破断張力106 t, 破断伸び率51%であるので許容量ぎりぎりである。現地で用いられるロープは80 mmφであり、計算に用いた75 mmφよりは強度が高く、また、係留索の底部に設けられたシンカーおよび地鎖による衝撃力の低減効果もある程度は期待できるので、安全率は今回の計算結果よりは大きいものと予想される。しかし一方では、衝撃的な力に対して係留ロープが図-2のような静的な伸び特性を示すかどうか疑問であり、また衝撃的な荷重に対してナイロンロープの破断強度が15%程度減少するという報告³⁾もある。したがって、係留索の設計に際しては、以上の各要素について充分に考慮することが必要であると言える。

4. 結 語

本文では、波浪観測用の厚円盤型ブイの波浪中の動揺特性について検討を加えた。その結果、今回実験に用いたブイは、現地で測定の対象とする5～20 secの波に対し、ほぼ良好な応答特性を持っているものと考えられる。また、係留ロープの安全性について検討するための一手法を示した。

なお、本研究は、運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所の依頼により実施したものであることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 井島武士・田淵幹修・湯村やす: 有限水深の波による円柱状浮体の運動, 土木学会論文報告集, 第206号, pp. 71～84, 1972年10月, あるいは, 合田良実・鈴木康正・笹田 正: 波浪中の直立円柱浮体に働く流体力とその運動, 港湾技術研究所報告, 第15巻, 第2号, pp. 167～210, 1976年6月。
- 2) Kim, W. D.: On the harmonic oscillations of a rigid body, J. Fluid Mech., Vol. 21, Part 3, pp. 427～451, 1965.
- 3) Borwick, C. R., Mech, M. I. and G. Elliot: Dynamic properties of marine fibre ropes, 2nd International Tug Conference, pp. B4-1～8.