

運輸省港湾技術研究所

# 港湾技術研究所 報告

---

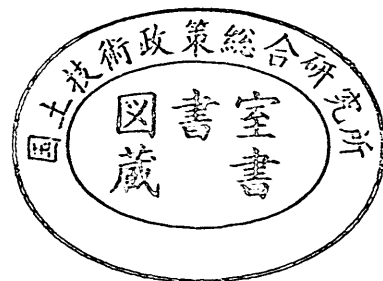
---

REPORT OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH  
INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT

---

VOL. 14      NO. 2      JUNE 1975

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



# 港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I)

第14巻 第2号 (Vol. 14, No. 2), 1975年6月 (June 1975)

## 目 次 (CONTENTS)

1. 備讃瀬戸における海底砂州, サンドウェーブの調査 .....小 笹 博 昭..... 3  
(Field Investigation of Submarine Banks and Large Sand Waves  
.....Hiroaki OZASA)
2. 矩形断面浮体の波浪動揺に関する研究 .....木 原 力, 轟 正 彦.....47  
(Etude sur les Mouvement d'un Corps Flottant Rectangulaire dans la Houle  
..... Tsutomu KIHARA and Masahiko TODOROKI)
3. 円形断面緊張繫留浮体の防波効果と繫留力  
..... 木 原 力, 北 谷 高 雄, 轟 正 彦.....79  
(A Study on the Function and Mooring Force of Floating Breakwaters with Circular  
Cross Section .....Tsutomu KIHARA, Takao KITATANI and Masahiko TODOROKI)
4. 栈橋スラブ上のコンクリート舗装の収縮ひびわれと防止対策  
..... 佐 藤 勝 久, 森 口 拓, 浅 島 豊 明, 洪 谷 英 男... 111  
(Control of Shrinkage Cracking of Concrete Pavements on pier Slabs  
.....Katsuhisa SATO, Hiraku MORIGUCHI, Toyoaki ASAJIMA and Hideo SHIBUYA)
5. 空港舗装路盤としてのコーラルリーフロックの評価 (第1報)  
..... 佐 藤 勝 久, 福 手 勤, 浅 島 豊 明, 洪 谷 英 男... 139  
(An Appraisal of Coral Reef Rock as the Base Course Material of Airport Pavements  
(Ist Report)  
..... Katsuhisa SATO, Tsutomu FUKUDE, Toyoaki ASAJIMA and Hideo SHIBUYA)

### 3. 円形断面緊張繫留浮体の防波効果と繫留力

木原 力\*・北谷 高雄\*\*・轟 正彦\*\*\*

#### 要 旨

浮防波堤の一案としての円形断面緊張繫留浮体の防波効果および繫留索に生じる繫留張力を断面模型実験を行なうことにより求めた。

その結果、水深10m地点に外径10mの浮体をその中心が静水面に一致するよう緊張繫留して設置するとした場合、入射波周期が7秒程度の波に対し防波効果は約50%となり、繫留索に生じる張力は波高1m、浮体長1m当り堤外側で±3.7t、堤内側で±1.3t程度になることが分った。

こうした実験結果をもとに、浮体背後への波高伝達率および波により繫留索に生じる張力を推定するための近似式の導入を図った。また、矩形断面浮体と比較することにより、円形断面緊張繫留浮体の特質を把握すると共に、波浪による浮体繫留力をより減らす目的で改良型円形断面浮体を考案し、その特性実験を行なった。

---

\* 前水工部 高潮津波研究室長

\*\* 水工部 防波堤研究室

\*\*\* 水工部 模型試験課

## A Study on the Function and Mooring Force of Floating Breakwaters with Circular Cross Section

**Tsutomu KIHARA\***

**Takao KITATANI\*\***

**Masahiko TODOROKI\*\*\***

### Synopsis

The function of tightly anchored floating body of circular cross section as a breakwater and the tension imposed on the anchor cables are examined, through two-dimensional model experiments.

The results show that a floating body of 10 meters in diameter, anchored at a water depth of 10 meters and of which center of gravity is set at the level of still water surface, reduces wave height as far as 50% for wave period of 7 seconds. In this case, the amplitude of tension fluctuation, per 1 meter in wave height and 1 meter in horizontal length of the floating body, is 3.7 ton in the front anchor cables and 1.3 ton in the rear ones.

These experimental results in regard to the circular cross section are fairly well estimated by the calculation based on an approximate theory in regard to rectangular cross section of which area is equivalent to that of the circular cross section.

In addition, the advantage claimed for circular cross section is appreciated, being compared with rectangular cross section. Moreover, improved cross sections are presented with a view to reducing the tension in the anchor cables, and the improved cross sections are tested in model experiments.

---

\* Ex-Chief of the Storm Surge and Tsunami Laboratory, Hydraulic Engineering Division

\*\* Member of the Breakwaters Laboratory, Hydraulic Engineering Division

\*\*\* Member of the Model Test Section, Hydraulic Engineering Division

## 目 次

要 旨	79
1. ま え が き	83
2. 円形断面緊張繫留浮体に関する模型実験	83
2.1 使用水路	83
2.2 模 型	83
2.3 測 定	84
2.4 実験諸元	84
3. 実験結果	85
3.1 繫 留 力	85
3.2 防波効果	86
3.3 張力振幅および波高伝達率に関する近似式	86
3.4 碎波のもとでの張力および伝達波高	89
3.5 繫留索のたるみによる衝撃的張力	90
4. 矩形断面緊張繫留浮体との比較	90
4.1 矩形断面緊張繫留浮体に関する理論	91
4.2 計算値による比較	92
4.3 実験値による比較	93
5. 改良型円形浮体	98
5.1 考 え 方	98
5.2 改良型円形浮体の実験—円形浮体との比較	101
6. 現地波に対する検討	103
6.1 近似理論による張力振幅・波高伝達率の算定図	103
6.2 円形断面緊張繫留浮体の防波効果	103
6.3 浮 体 繫 留	107
7. あとがき	109
参考文献	109
記号一覧表	110

## 1. まえがき

円形断面緊張繫留浮体とは、図 1.1 に示すように、円筒状の浮体を繫留索により強制的にある深さまで沈めたもので、波の作用を受けても浮体の浮力とつり合う初期張力により、繫留索にたるみを生じない。

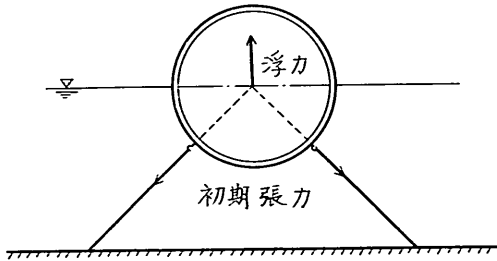


図 1.1 円形断面緊張繫留浮体

こうした浮体が波の作用を受ける場合、次のような特徴を有すると考えられる。

① 波力を受けると、一般の緊張繫留浮体は繫留索の交点を中心に回転運動を生じる。断面が円形の場合には、浮体表面に垂直な波力の作用線は常に円の中心を通るので、繫留索の交点が円の中心と一致していれば浮体は回転を生じない。また、仮に回転を生じたとしても、断面が円形のため回転運動による発生波はない。

② 浮体を緊張繫留することにより、繫留索がたるみ状態から緊張する際に生じる衝撃的張力の発生を避けることができる。

こうした特徴を有する円形断面緊張繫留浮体を浮防波堤の一案として用いるようとする考え方は、伊藤によって示されたもので、その防波効果については既に簡単な

断面模型実験が行なわれている<sup>1)</sup>。

このたび我々は、さらに詳しい断面模型実験を行なうことにより、円形断面緊張繫留浮体の繫留力をも含めた水理的諸特性について検討したのでここに報告する。

## 2. 円形断面緊張繫留浮体に関する模型実験

### 2.1 使用水路

実験は港湾技術研究所内の中型造波水路で行なった。水路諸元は長さ 39.6m、幅 0.48m、深さ 0.9m で水路の一端にフラップ型造波機と鉛直振動流型造波機を有する。今回の実験はこのうち鉛直振動流型造波機を用いた。この造波機は周期 1.5~3.5 秒、最大波高 30cm までの規則波を発生させることができる。図 2.1 に水路における模型設置状況を示す。

### 2.2 模 型

#### (1) 浮 体

円形断面の模型浮体として大きさの異なる 2 種類の管を用いた。一つは外径 50cm の塩化ビニールパイプ内を外径 32cm および 10cm のアクリル樹脂パイプで三重に仕切ったものであり、他の一つは外径 32cm の一重のアクリルパイプである。両者とも浮体の長さはほぼ水路幅に一致し、47cm とした。模型浮体の空中重量は外径 52cm のもので約 27kg、外径 32cm のもので約 3.6kg である。浮体自重による静水中での計算吃水はそれぞれ 12.7cm および 3.7cm になる。

#### (2) 繫 留 索

模型繫留索は波浪による張力変動のもとで十分な抗力を有し、しかもあまり伸び縮みしないよう径 2mm の鋼製鎖を使用した。なお、この鎖の破断強度は約 180kg である。

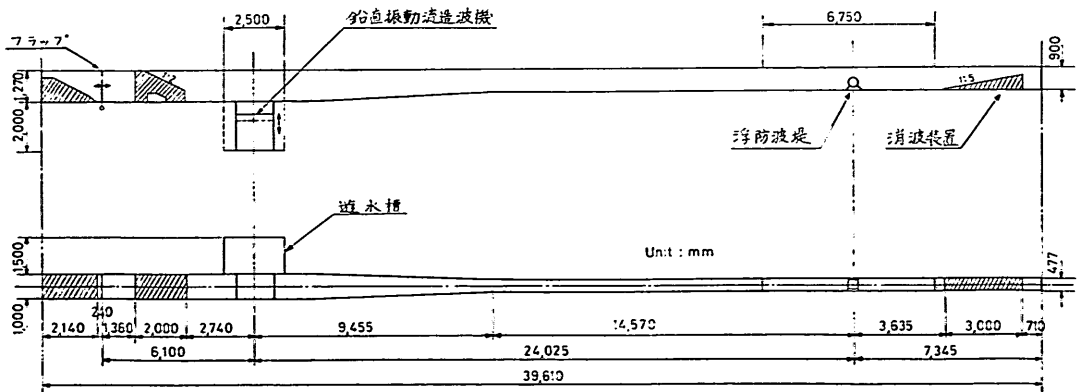


図 2.1 水路諸元と模型位置

2.3 測定

(1) 張力計

繫留索に生じる張力変動を測定するため図2.2に示す形状のアクリル樹脂製張力計を用いた。これは張力を曲げ歪に変換して測定するもので、その原理状況は次のようである<sup>2)</sup>。

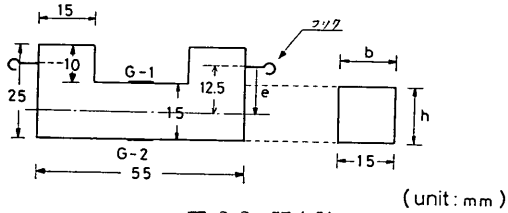


図 2.2 張力計

水平部材の中心線から測った張力  $P$  の作用距離を  $e$  とすると、水平部材の両縁に貼付した歪ゲージ G-1, G-2 の位置での歪  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  は次式で表わされる。

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E} \left\{ \frac{P}{A} + \frac{Pe}{W} \right\} \quad (1.1)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E} \left\{ \frac{P}{A} - \frac{Pe}{W} \right\} \quad (1.2)$$

ここに

$$\left. \begin{array}{l} A: \text{断面積} \\ W: \text{断面係数} \end{array} \right\} \quad (1.3)$$

歪  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  を差の形で得る 2 ゲージ法で測定すると、出力される歪  $\varepsilon_m$  は

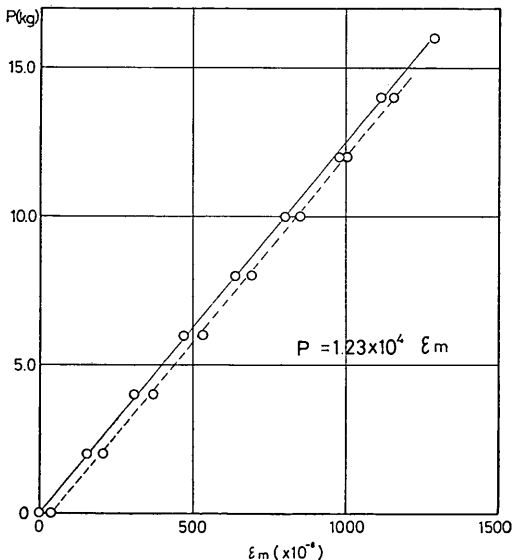


図 2.3 張力計における荷重と歪の関係

$$\varepsilon_m = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \frac{2Pe}{EW} \quad (1.4)$$

すなわち、張力  $P$  と測定歪  $\varepsilon_m$  の関係は

$$P = \frac{EW}{2e} \varepsilon_m \quad (1.5)$$

となり、張力  $P$  は測定歪  $\varepsilon_m$  に一次比例する。よって、各張力計について荷重検定を行ない、荷重  $P$  と測定歪  $\varepsilon_m$  の関係から比例係数  $EW/2e$  を逆算しておけば、測定歪から作用張力  $P$  を求めることができる。

図2.3は一例として張力計1について行なった荷重検定試験の結果を示したものである。なお、アクリル樹脂の弾性係数を  $E=4 \times 10^4 \text{kg/cm}^2$  として計算により求めた比例係数は  $0.9 \times 10^4$  となる。

(2) 張力測定

浮体は水路幅方向に前後 2 箇所計 4 点で繫留しており、波により各繫留索に生じる張力変動を繫留索途中に接続した張力計で、歪の変動として電磁オシログラフを通し記録した。この記録をもとに予め各張力計について決定しておいた歪・力の関係から、張力を逆算した。

(3) 波高測定

波高は原則として容量式波高計により計測し、適宜ものさしも用いた。入射波高はあらかじめ浮体設置位置付近の通過波高を測定することにより決定した。なお、波高は水路終端に置かれた消波装置からの反射の影響により、場所的に僅かづつ異なるので波高測定位置付近の最大および最小波高の平均値をとってその点の波高とした。

2.4 実験諸元

(1) 実験ケース

実験ケースとして次の 3 種類をとった。

ケース 1 : 外径 50cm の浮体を用い、水深 50cm, 吃水 25cm で行なった。

ケース 2 : ケース 1 に対し潮位を 10cm 上げその影響を検討する。すなわち、このケースでは、浮体外径 50cm, 水深 60cm, 吃水 35cm になる。

ケース 3 : 外径 32cm の浮体を用い、水深 32cm, 吃水 16cm の状態で実験を行なった。

実験ケース 1 と 3 では、用いた浮体の大きさは異なるが、水深と浮体外径, 吃水と浮体半径はそれぞれ等しく、本質的には同一の条件で実験を行なっていることになる。あえてケース 3 の実験を行なう理由は次のとおりである。

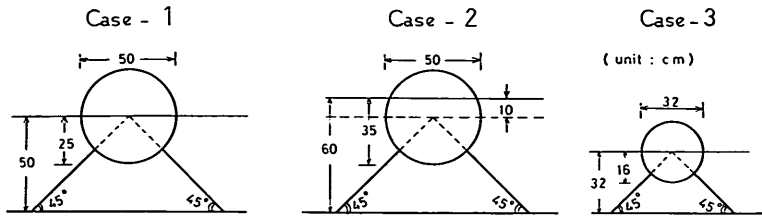


図 2.4 実験ケースおよび諸元

ケース1で用いた模型浮体は2.2で述べたように、かなりの自重を有する。ちなみに、浮体半径に対する非繫留時の計算吃水の比は約0.5となる。このため、実験において、波高がある程度以上になると、繫留索にたるみを生じ、これが再び緊張する際に衝撃的張力を発生する。そこで、ケース3において、比較的自重の軽い外径32cmの浮体〔非繫留時の計算吃水/浮体半径=0.23〕を用い、相対的により大きい波を作用させると共に、ある1つの入射周期について、非砕波から砕波後の波にいたるまで波高を変化せしめて、これが繫留索の張力変動および浮体の防波効果にどう影響するかを検討する。また、ケース1と3とで縮尺が変わることにより、附随的に縮尺効果の影響も検討し得る。

図2.4は各ケースの実験条件を示したものである。

(3) 入射波周期

入射波周期は以下のようにして決定した。まず、仮に円形断面緊張繫留浮体が現地に建設されるとして、この現地浮体の諸元を次のように設定する。

- 水深:  $h=10\text{m}$
- 浮体外径:  $D=10\text{m}$
- 浮体吃水:  $d=5\text{m}$

以上の条件を仮定することにより、現地および模型浮体の諸元から模型縮尺が決定できる。すなわち、ケース1, 2では、 $1/20$ 、ケース3では $1/31$ となる。次に、現地における波の周期はほぼ3~15秒の範囲にあると考えられるので、原則としてこの範囲の各奇数秒の周期(3, 5, 7, ... 15秒)を採用する。これら現地波周期を、模型縮尺を考慮して模型波周期に変換する。ただし、2.1で述べ

表 2.1 入射波周期

ケース	縮尺	模型波周期 (sec)					
1, 2	$1/20$	1.57	1.70	2.01	2.46	2.91	3.35
3	$1/31.2$			1.61	1.97	2.33	2.68
現地波周期		7.0	7.6	9.0	11.0	13.0	15.0

たように造波機の発生可能周期に制限があるので、実際に模型で再現された波は表2.1に示すように現地換算周期で7~15秒の範囲であった。

(4) 入射波高

表2.1で示された各ケース毎の入射波周期について、波高を変化させ繫留索の張力変動および伝達波高を測定した。ここで波高は造波機の偏心  $e$  を3cmから2cmきざみに増加させ変化せしめた。

3. 実験結果

3.1 繫留力

実験ケース1~3において、入周波周期をパラメータとし、入射波高に対する繫留索の測定張力の関係を示し

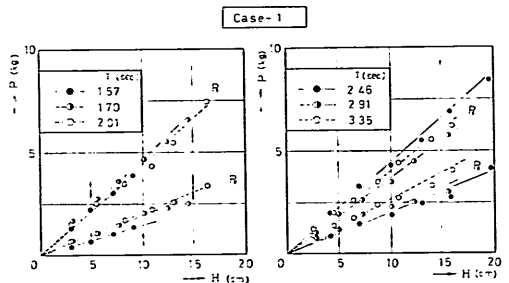


図 3.1 入射波高に対する張力振幅 (ケース 1)

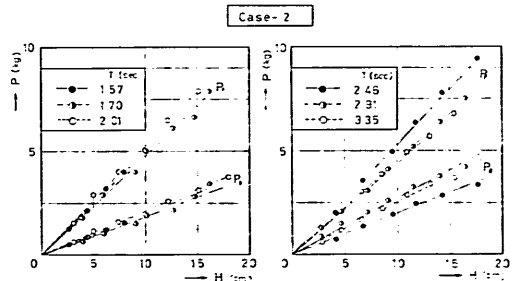


図 3.2 入射波高に対する張力振幅 (ケース 2)

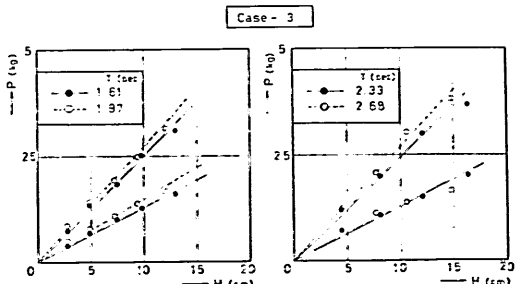


図 3.3 入射波高に対する張力振幅 (ケース 3)



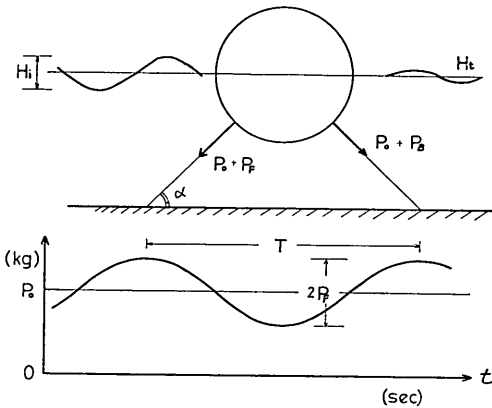


図 3.4 測定張力の模式図

たのが図 3.1~3.3 である。

実験において測定される張力は図 3.4 に模式的に示すように、既に繫留索に生じている初期張力  $P_0$  を中心に波による張力の変動  $P_F$  (堤外側),  $P_B$  (堤内側) が記録されるが、記録紙から正および負の張力振幅を正確に読み取ることは容易でない。なぜなら、波の質量輸送による平均水位の上昇が、繫留索の張力変化となって現われ、記録紙上で零点変動をするからである。そこで張力記録の山から谷の値を引いた変動張力の全振幅の半分をとりこれを張力振幅とした。また、張力は堤外、堤内側とも 2 箇所測定しているが、それぞれについてこれら 2 つの記録の間に程大きな差異はなく便宜上その平均値をとって示してある。すなわち、図 3.1~3.3 に示す張力値  $P_F$ ,  $P_B$  は堤外側および堤内側繫留索に生じる浮体長 23.5cm 当りの張力振幅の値を表わす。

これらの図からも分るとおり、波により繫留索に生じる張力振幅は、いかなる入射波周期についても波高にほぼ一次比例しており、図中の直線で代表される。

### 3.2 防波効果

図 3.5~3.7 は円形断面緊張繫留浮体の防波効果を調

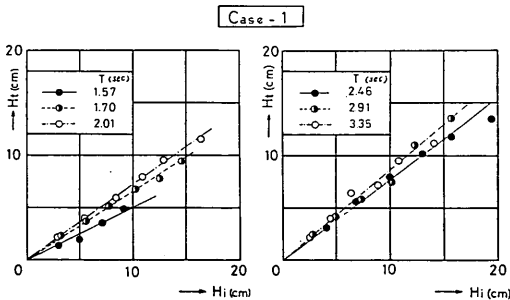


図 3.5 入射波高に対する伝達波高 (ケース 1)

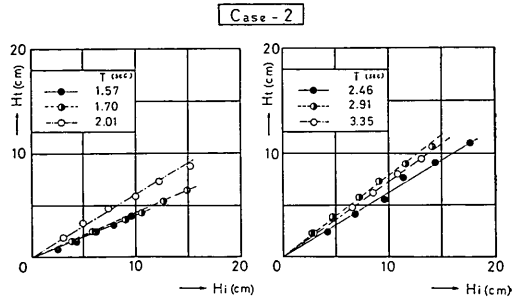


図 3.6 入射波高に対する伝達波高 (ケース 2)

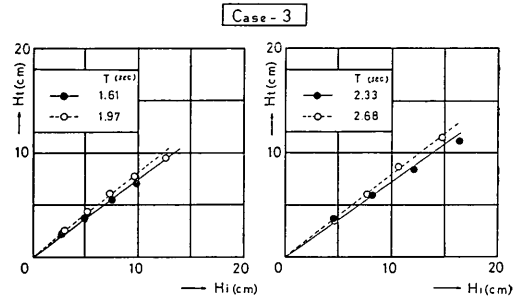


図 3.7 入射波高に対する伝達波高 (ケース 3)

べるため、それぞれのケースについて入周波周期をパラメータとし入射波高と伝達波高の関係を示したものである。これらの図から明らかなように、浮体背後の伝達波高についても張力変動と同様、おおむね入射波高に一次比例している。すなわち、入射波高に対する伝達波高の比で定義される波高伝達率 ( $K_T$ ) は、入射波周期が決まれば波高に関係なくほぼ一定であるといえる。

### 3.3 張力振幅および波高伝達率に関する近似式

円形断面緊張繫留浮体の繫留張力および伝達波高についての実験は、図 2.4 に示した 3 ケースについて行なったもので、その結果については既に述べた。しかしながら、実験ケースは非常に限られており、一般的な考察をなすには十分でない。そこで、ここでは円形断面緊張繫留浮体の張力振幅および波高伝達率を推定するための近似式の導入を図り、こうした浮体の水理的諸特性を検討するための一助となす。

円形断面緊張繫留浮体は波による浮体動揺が無視できる程小さいので、これを半浸水状態の固定円柱と考えることができる。Dean および Ursell は微小振幅波の仮定のもとに半浸水固定円柱の波の伝達率および反射率を計算している\*。しかし、この計算は水深無限の海域に

\* 計算結果については、文献 (3) を参照されたい

円形断面緊張繫留浮体の防波効果と繫留力

固定された円柱に対するもので、比較的浅海に設置される円形断面緊張繫留浮体には適さない。また、船舶流体力学分野においては、船体を半没水状の円柱に写像し、円柱の運動から船体運動を推定する試みがなされている。これは浮体運動の振幅および位相を予め仮定しておき、与えられた運動および境界条件を満足するようにこれらを決定する方法が採られる。しかし、この計算法自体が複雑な数値計算を必要とするのみならず、一般に船体の深海域での運動を取り扱っているため、我々の問題に対し直接的な適用はできない。

一方、1 で述べたように円形断面緊張繫留浮体の防波効果については既に簡単な模型実験が行なわれており、その結果波高伝達率は円形浮体を断面積が等価な矩形固定浮体で置き換え、この矩形浮体に対し理論値を適用することにより比較的良好に表現されることが確かめられている。

以上のことから、ここでも円形断面浮体を矩形固定浮体に置き換え、この矩形浮体に対する作用波力の理論値から、円形断面緊張繫留浮体の繫留張力を推定する近似式を導く。ただし、矩形浮体に対する理論値としては、伊藤・千葉<sup>5)</sup>が与えた式を用いる。

(1) 近似式

まず、図 3.8 に示すように円形浮体をそれと等価な断面積を有する矩形固定浮体（換算矩形浮体）に置き換える。円形浮体の外径を  $D$  とすると、換算矩形浮体の半幅  $l$  は、

$$l = \frac{\sqrt{\pi}}{4} D = 0.443D \quad (3.1)$$

で表わされる。

次に、矩形固定浮体に作用する水平力および揚圧力は浮体単位長さ当り

水平力：
$$P_H = 2\rho g d a f_H / (1 - i y_B) \quad (3.2)$$

揚圧力：
$$P_U = 2\rho g l a f_B \quad (3.3)$$

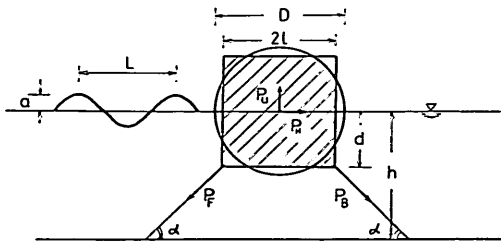


図 3.8 円形浮体に対する換算矩形固定浮体

で与えられる\*。ただし、 $P_H, P_U$  の正は図 3.8 の矢印方向とする。

浮体に作用する水平、揚圧力が繫留索の波による張力変動とつり合うことから、堤外側および堤内側の繫留索に生じる張力変動  $P_F, P_B$  は繫留索と海底とのなす角度を  $\alpha$  として、次のように与えられる。

$$P_F = \frac{1}{2} \left( \frac{P_U}{\sin \alpha} + \frac{P_H}{\cos \alpha} \right) \quad (3.4)$$

$$P_B = \frac{1}{2} \left( \frac{P_U}{\sin \alpha} - \frac{P_H}{\cos \alpha} \right) \quad (3.5)$$

(3.2)~(3.5) 式から

$$P_F = \frac{1}{2} \left( \frac{2\rho g l a f_B}{\sin \alpha} + \frac{2\rho g d a f_H}{\cos \alpha} \frac{1}{1 - i y_B} \right) \quad (3.6)$$

$$P_B = \frac{1}{2} \left( \frac{2\rho g l a f_B}{\sin \alpha} - \frac{2\rho g d a f_H}{\cos \alpha} \frac{1}{1 - i y_B} \right) \quad (3.7)$$

で得られる。

結局、振幅(半波高)  $a$  の入射波による張力振幅  $|P_F|, |P_B|$  は  $\alpha = 45^\circ$  として、(3.6), (3.7) 式から次のように与えられる。

$$|P_F| = \frac{2\rho g a}{\sqrt{2}} \sqrt{\left( l f_B + \frac{d f_H}{1 + y_B^2} \right)^2 + \left( \frac{d f_H y_B}{1 + y_B^2} \right)^2} \quad (3.8)$$

$$|P_B| = \frac{2\rho g a}{\sqrt{2}} \sqrt{\left( l f_B - \frac{d f_H}{1 + y_B^2} \right)^2 + \left( \frac{d f_H y_B}{1 + y_B^2} \right)^2} \quad (3.9)$$

また、浮体に作用する水平および揚圧力振幅は、(3.2), (3.3) 式から以下のように表わされる。

$$|P_H| = \frac{2\rho g d a f_H}{\sqrt{1 + y_B^2}} \quad (3.10)$$

$$|P_U| = 2\rho g l a f_B \quad (3.11)$$

ここで、 $f_B, f_H, y_B, n, \sigma, k$  は次式で与えられる定数である。

$$\left. \begin{aligned} f_B &= \frac{\sinh k(h-d)}{k(h-d) \cosh kh} \\ f_H &= \frac{\sinh kh - \sinh k(h-d)}{kd \cosh kh} \\ y_B &= \frac{g}{\sigma^2 l} \frac{k(h-d) f_B^2}{n} \\ n &= \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \\ \sigma &= 2\pi/T, \quad k = 2\pi/L \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

一方、波高伝達率  $K_T$  は次式で関係づけられる。

\* 式の誘導法については文献 (5) 参照

$$K_T = \frac{y_B}{\sqrt{1+y_B^2}} \quad (3.13)$$

(2) 実験値と近似理論値の比較

既述の如く、実験により得られた繫留索の張力振幅および浮体背後の伝達波高は、入射波高にはほぼ一次比例している。また、近似式より得られる張力および伝達波高についても波高に対し線型である。そこで、図3.1~3.7において、直線で代表した実験結果を近似式による理論値と比較する。ただし、結果はケース1と3の間の縮尺効果の影響をも見るため、すべて無次元化して示す。すなわち、横軸には水深  $h$  と波長  $L$  の関数  $2\pi h/L = (kh)$  を、縦軸には張力振幅  $|P|$  を水の単位体積重量  $w$ 、入射波高  $H$ 、浮体外径  $D$ 、浮体長さ  $B$  で除した無次元値  $|P|/wHDB$  又は波高伝達率  $K_T$  をとった。

図3.9はケース1, 3の張力振幅の実験値と近似式による理論値とを比較したもので、堤外側繫留索に生じる張力振幅  $P_F$  は理論値と実験値ではほぼ合致すること、堤内側の張力振幅  $P_B$  は一般に理論値が大きき、特に波長が長い(すなわち  $kh$  が小さい)場合にこの傾向が強いこと、また、ケース1と3の間に縮尺の差異による結果

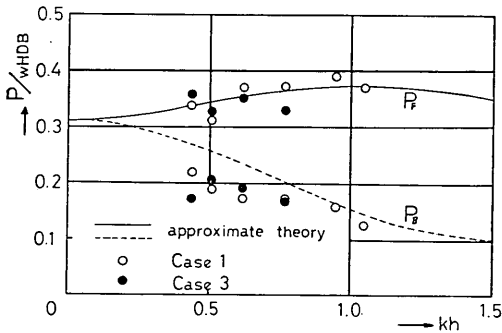


図 3.9 張力振幅に関する実験値と理論値の比較 (ケース 1, 3)

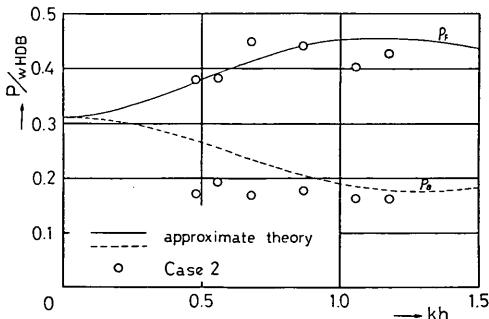


図 3.10 張力振幅に関する実験値と理論値の比較 (ケース 2)

の相違はあまり無いことなどが分る。図3.10は潮位の影響を検討するために行なったケース2の張力振幅について近似式による理論値と実験値を比較したもので、個々の値を見ると理論値は必ずしも実験値と合わないが、全般的な傾向としてはほぼ合致するといえよう。

次に波高伝達率についての比較を示したのが図3.11と図3.12である。これら2つの図から分るように波高伝達率についての近似式による理論値は、実験値と傾向は合うが一般に大き目の値を与えるようである。

いずれにしても、こうした比較から円形断面緊張繫留浮体の波による張力振幅および波高伝達率は、換算矩形固定浮体に対する理論値を適用することにより、ある程度の推定が可能であるといえよう。

(3) 近似式による波力および繫留力の検討

換算矩形浮体に対する理論値を用いて、円形断面緊張繫留浮体の作用波力および繫留索に生じる張力について若干の考察を試みる。図3.13は、換算矩形浮体に作用する水平力、揚圧力、張力振幅についての計算結果を無次元表示したものである。この図から、 $h/L \rightarrow 0$  の場合、

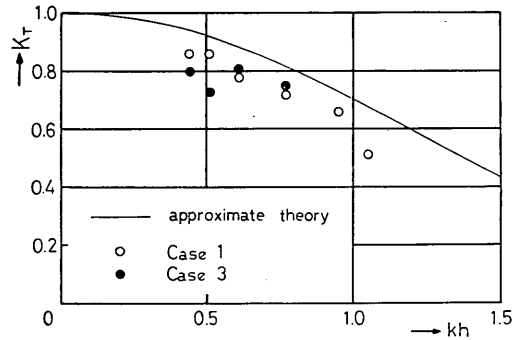


図 3.11 波高伝達率に関する実験値と理論値の比較 (ケース 1, 3)

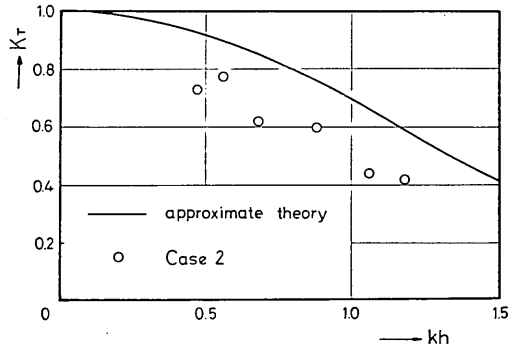


図 3.12 波高伝達率に関する実験値と理論値の比較 (ケース 2)

円形断面緊張繫留浮体の防波効果と繫留力

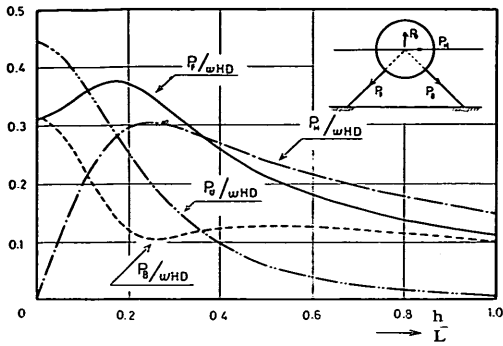


図 3.13 換算矩形浮体に作用する水平・揚圧・張力振幅

浮体には揚圧力のみが作用し堤外側および堤内側の繫留索には同じ張力が生ずること、また、 $h/L$  が大きくなると浮体に作用する水平・揚圧力ともに漸減し、それに応じて繫留索に生じる張力も小さくなること、堤外側の張力が常に堤内側より大きいことなどがわかる。さて、ここで浮体に作用する水平力、揚圧力に着目してみよう。 $h/L$  がかなり大きい領域では、揚圧力より水平力の方が卓越する。 $h/L \approx 0.17$  になると水平・揚圧力はほぼ同じ大きくなり、 $0.17$  以上になると水平力よりむしろ揚圧力が卓越する。

いま、水深10m地点に外径10mの円形浮体をその中心が静水面に一致するよう設置すると仮定した現地浮体に対し、 $h/L=0.17$  が入射波周期何秒の波に相当するかを求める。表 3.1 は  $T=4 \sim 15$  秒の各入射波周期について水深10m地点における波長  $L$ 、相対水深  $h/L$ 、無次元値  $kh$  を微小振幅波理論により計算した値である。表より  $h/L=0.17$  は  $T \approx 7$  秒に相当し、これ以上の周期については、浮体には水平力よりむしろ揚圧力が卓越する。

表 3.1 水深10m地点での波長、水深波長比

$T$ (sec)	$L$ (m)	$h/L$	$kh$	$T$ (sec)	$L$ (m)	$h/L$	$kh$
4	24.7	0.406	2.55	10	92.4	0.108	0.68
5	36.6	0.273	1.72	11	102.9	0.097	0.61
6	48.4	0.207	1.30	12	113.3	0.088	0.55
7	59.8	0.167	1.05	13	123.6	0.081	0.51
8	70.9	0.141	0.89	14	133.9	0.075	0.47
9	81.3	0.123	0.77	15	144.1	0.069	0.43

3.4 砕波のもとでの張力および伝達波高

以上では、繫留索に生じる張力振幅は波高にほぼ一次

比例し、その値は円形浮体を矩形固定浮体に置き換えた近似式で推定可能であることを述べた。しかしながら実験は、もともと非砕波を対象としたもので、砕波ないしは砕波しかけるような波高の大きな波までは作用させなかった。ここでは、砕波のもとでの張力および伝達波高の実験結果について述べる。実験は、ケース3の入射波周期1.97秒について、非砕波の状態から完全に砕波し終える状態に到るまで波高を増大してゆき繫留索に生じる張力振幅および伝達波高を測定した。

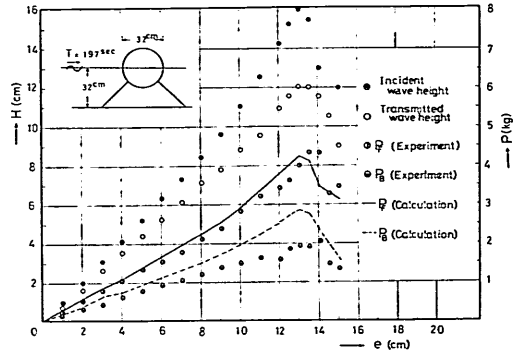


図 3.14 張力振幅および伝達波高に及ぼす砕波の影響

図3.14は横軸に造波機の偏心  $e$  をとり波高および繫留索の張力振幅をプロットしたものである。実験中の観察によれば、浮体を設置しない状態で波を作用させた通過波 (=入射波と考えた) は  $e=13\text{cm}$  のとき浮体位置の前方4mで崩れ波型の砕波を起す。 $e=14\text{cm}$  になると、砕波点がずっと沖側に移動し、浮体位置の前方15mで砕波する。次に繫留索の張力および浮体背後の伝達波高を測定するため、浮体を設置し波を作用させたところ、 $e=12.5\text{cm}$  で浮体天端を越える僅かな越波を生じ、浮体前面では部分重複波の砕波が見られた。 $e=12.5 \sim 14\text{cm}$  では、砕波しかけた重複波が浮体に作用する。更に偏心を上げ  $e=14.5\text{cm}$  にすると、波は浮体前方15mで完全に砕波し、浮体には砕波後の波が作用する。実験を通じて、浮体は波の作用のもとでも動揺を起さず、固定浮体のごとく安定であった。写真1, (a)(b) は浮体に波の山および谷が作用したときの状況を示したものである。

さて、張力振幅の実験値と近似式による理論値を比較すると、偏心14cmのとき両者の差が大きい。これは上述のごとく、 $e=14\text{cm}$  で通過波は浮体前方15mで砕波するのに、浮体を設置した場合には必ずしもこの砕波が生じないことによる。この点を除けば、堤外側の繫留索に生じる張力振幅  $P_p$  はほぼ線型計算値に合致し、堤内側

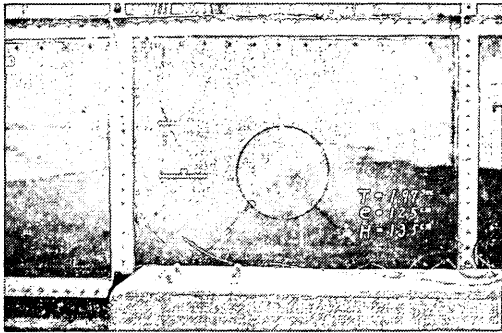


写真 1(a) 円形断面緊張繫留浮体への波の作用状況

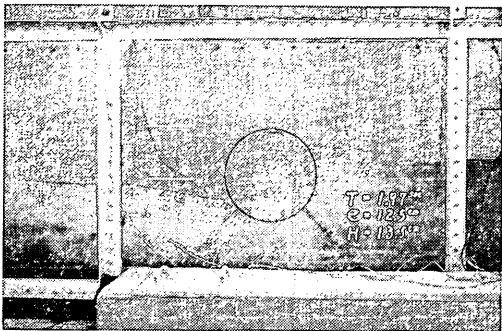


写真 1(b) 円形断面緊張繫留浮体への波の作用状況

表 3.2 張力に対する繫留索のたるみの影響

T (sec)	たるみ有り h=40cm					たるみ無し h=50cm				
	H	P <sub>F</sub>	P <sub>B</sub>	P <sub>F</sub> *	P <sub>B</sub> *	H	P <sub>F</sub>	P <sub>B</sub>	P <sub>F</sub> *	P <sub>B</sub> *
1.57	3.2	4.8	0.5	1.29	0.13	3.0	1.3	0.4	0.37	0.11
1.70	3.4	4.6	0.5	1.13	0.13	3.2	1.7	0.7	0.45	0.20
2.01	3.6	4.4	1.6	1.00	0.37	2.9	1.5	0.6	0.44	0.19
2.46	4.6	4.8	2.4	0.90	0.45	4.1	2.0	0.8	0.42	0.18
2.91	3.1	1.9	1.4	0.54	0.40	2.8	1.0	0.8	0.32	0.23
3.35	2.8	0.9	1.1	0.25	0.34	2.5	1.2	0.9	0.41	0.31

(注) H: cm P: kg P\* = P/wHDB

表 3.2 は繫留索がたるみ得る状態（水深 40cm）で、造波機偏心を 3cm に固定し、各周期について測定した張力振幅\*およびその無次元値を、繫留索のたるまないケース 1（水深 50cm）のそれと比較したものである。両者で実験条件が若干異なるため直接的な数値の比較はできないが、ごく概略的にいって、繫留索のたるみによる衝撃的張力の大きさは特に周期が短くなると緊張時の張力の 2～3 倍にも達することがわかる。図 3.15 は張力の測定記録の一例を示したもので、緊張時の時間的な張力変動がほぼ正弦波で表わされるのにくらべ、たるみ状態では衝撃的張力の出現が見られる。

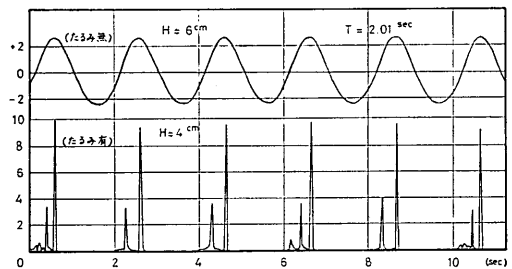


図 3.15 繫留索のたるみ有無による張力測定記録例

繫留索の張力  $P_B$  は線型計算値以下である。このことは、円形断面緊張繫留浮体には、直立不透過堤に生ずるような大きな碎波力が起らなかったことを意味している。この 1 ケースの実験から円形断面緊張繫留浮体には衝撃的碎波力が生じないとは断言できないが、浮体下方から波が透過し得ること、浮体が円形断面をなすこと等を考えると、碎波力については少なくとも直立不透過堤に対するほど大きな問題とならないことが予測される。

### 3.5 繫留索のたるみによる衝撃的張力

上に述べてきた実験結果は、浮体が波の作用を受けても繫留索にはたるみを生じない緊張繫留浮体に対し得られたものであった。ここでは、繫留索にたるみを生じ得る場合の張力についての実験結果を掲げておこう。実験はケース 1 に対し潮位が 10cm 下がった状態で行なった。この場合、静水中において浮体自重と浮力がほぼ釣り合い、繫留索の初期張力はほとんど零であった。この初期の状態のもとで浮体に波を作用させると、波の谷が来たとき浮体は鉛直下方に運動し、これに伴い繫留索にたるみを生じる。続いて波の山が通過する際、浮体は上方に運動し繫留索が緊張する瞬間に衝撃的張力が発生する。

### 4. 矩形断面緊張繫留浮体との比較

円形断面緊張繫留浮体の繫留力および防波効果についての実験的、理論的な検討結果は既に前章で述べた。この章では他断面浮体の一例としての矩形断面緊張繫留浮体と比較することにより円形断面の特質を検討する。

\* 測定張力全振幅の半分を張力振幅とした。測定張力は 1 波 1 波についてかなりのばらつきがあるが、これらの平均的な値をとっている。なお、測定最大張力については、全周期において、たるみ状態の方が大きい。

4.1 矩形断面緊張繫留浮体に関する理論

矩形断面緊張繫留浮体の繫留索に生じる張力，浮体の水平，回転振幅および波高伝達率については，既に伊藤・千葉が近似理論による展開を試みており，幾つかの計算例が示されている。しかしながら，そこに示された計算式は浮体の繫留点が浮体底面の角に一致している場合に限られており，後述の実験では必ずしもこの条件に合致しないので，ここに改めて計算式を掲げておく。

まず，図 4.1 に示すように緊張拘束された矩形浮体が入射波振幅  $a$  の波により，繫留索交点を中心に  $\theta$  だけ回転した状態を考える。図において  $l_1$  は浮体の重心から繫留点までの水平距離を表わす。この回転による浮体重心  $G$  の移動は， $\theta$  を微小と考えると水平移動  $\xi$  のみが残り，次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \xi &= \{l_1 \tan \alpha - (d+z_0)\} \theta \\ \zeta &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

拘束が無い状態での浮体の吃水を  $d_0$  とすれば，浮体の質量  $M_0$ ，メタセンター高  $\overline{GM}$ ，繫留索に生じている初期張力  $P_0$  は，

$$\left. \begin{aligned} M_0 &= 2\rho l d_0 \\ 2P_0 \sin \alpha &= V = 2\rho g l (d-d_0) \\ \overline{GM} &= \frac{l^2}{3d} - \frac{d}{2} - z_0 \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

で与えられる。ただし，浮体はすべて単位幅について考える。

波による繫留索の張力変動を  $P_F$ ， $P_B$ ，浮体運動による繫留角度の変化を  $\Delta\alpha$ ，繫留索の長さを  $S$  とすれば，

$$\Delta\alpha = \frac{l_1 \theta}{S \cos \alpha} = \frac{l_1}{S \cos \alpha} \cdot \frac{\xi}{l_1 \tan \alpha - (d+z_0)} \quad (4.3)$$

の関係から，浮体に作用する拘束力は次式で与えられる。

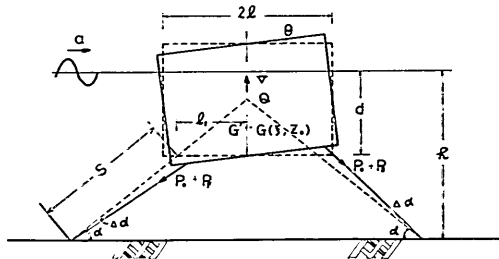


図 4.1 矩形断面緊張繫留浮体

\* 波力，拘束力などの外力は座標軸の方向（水平力は右向き，鉛直力は上向き）回転力は，反時計まわりを正として表わす。

る\*。

水平拘束力：

$$R_H = (P_B - P_F) \cos \alpha - \frac{2P_0}{l_1 - (d+z_0) \cot \alpha} \cdot \frac{l_1 \xi}{S}$$

鉛直拘束力：

$$R_V = -2P_0 \sin \alpha - (P_B + P_F) \sin \alpha$$

回転拘束力：

$$R_M = -(P_B - P_F) \cos \alpha \{l_1 \tan \alpha - (d+z_0)\} - 2P_0 \sin \alpha (l_1 \cot \alpha + d + z_0)$$

$$\times \left( \frac{l_1}{S \cos \alpha} + 1 \right) \theta^{**}$$

(4.4)

(4.2) および (4.4) 式を考慮して，浮体の運動方程式をたてると次のようになる。

水平運動：

$$-\sigma^2 M_0 \xi = 2\rho g d f_H (a - a_T) + (P_B - P_F) \cos \alpha - \frac{2P_0}{l_1 - (d+z_0) \cot \alpha} \cdot \frac{l_1 \xi}{S}$$

鉛直運動：

$$0 = 2\rho g l f_B a - (P_B + P_F) \sin \alpha$$

回転運動：

$$-\sigma^2 (I + I_1) \theta = -2\rho g d l f_M (a - a_T) - 2\rho g d l \overline{GM} \theta - (P_B - P_F) \cos \alpha \{l_1 \tan \alpha - (d+z_0)\} - 2P_0 \sin \alpha (l_1 \cot \alpha + d + z_0) \times \left( \frac{l_1}{S \cos \alpha} + 1 \right) \theta$$

(4.5)

連続条件式は (4.1) を考慮して

$$\frac{i k d f_H}{n} \xi - \frac{i k d f_M}{n} l \theta + (1 - i y_B) (a - a_T) = a \quad (4.6)$$

で表わされる。ここに常数  $f_H$ ， $f_B$ ， $n$  は (3.12) 式で与えられたとおりで， $f_M$  および  $I_1$  はそれぞれ次式で与えられる。

$$f_M = \frac{1}{k d k l \cosh kh} \left\{ -k z_0 \sinh kh + k(d+z_0) \sinh k(h-d) - \cosh kh + \cosh k(h-d) \right\} + \frac{l}{3d} f_B$$

$$I_1 = \frac{2\rho l^3}{h-d} \left\{ \frac{l^2}{45} + \frac{(h-d)^2}{9} \right\}$$

(4.7)

\*\* 文献 5) P. 157 の式 (7.4)  $M_R$  の右辺第 2 項および式 (7.5) 第 2 式，右辺第 2 項最後に  $\theta$  が印刷ミスのため欠陥...  $\left( \frac{l}{S \cos \alpha} + 1 \right) \theta$  となる。

(4.1), (4.2) 式の関係を用いることにより (4.5), (4.6) 式から  $\theta, a_T, P_F, P_B$  が決定できる。これらの方程式を解くにあたり、文献 5) にならって次のように置き換える。

$$\left. \begin{aligned} I_2 &= 2\rho l d_0 \overline{GQ}^2 \\ \overline{GQ} &= l_1 \tan \alpha - (d + z_0) \\ f_{MQ} &= f_M - \frac{\overline{GQ}}{l} \cdot f_H \\ \omega_D^2 &= \frac{d-d_0}{d_0} \frac{g}{GQ} \frac{l_1}{S \cos \alpha} \\ \omega_Q^2 &= \frac{2\rho g d l}{I+I_1+I_2} \left\{ \overline{GM} + \frac{d-d_0}{d} (l_1 \cot \alpha + d + z_0) \left( \frac{l_1}{S \cos \alpha} + 1 \right) + \frac{d-d_0}{d} \overline{GQ} \frac{l_1}{S \cos \alpha} \right\} \\ y_{BQ} &= y_B + y_Q \\ y_Q &= \frac{1}{\sigma^2 - \omega_Q^2} \frac{2\rho g d l^2}{I+I_1+I_2} \frac{k d f_{MQ}^2}{n} \\ K_Q &= f_H + \frac{\sigma^2 - \omega_D^2}{\sigma^2 - \omega_Q^2} \frac{I_2}{I+I_1+I_2} \frac{l}{GQ} f_{MQ} \end{aligned} \right\} (4.8)$$

これらを用いると解は以下のようになる\*。

$$\left. \begin{aligned} \frac{a_T}{a} &= -\frac{y_{BQ}}{1-iy_{BQ}} \\ \frac{l\theta}{a} &= \frac{1}{1-iy_{BQ}} \frac{1}{\sigma^2 - \omega_Q^2} \frac{2\rho g d l^2}{I+I_1+I_2} f_{MQ} \\ \frac{P_B}{\rho g d a} &= \frac{l}{d \sin \alpha} f_B - \frac{1}{1-iy_{BQ}} \frac{K_Q}{\cos \alpha} \\ \frac{P_F}{\rho g d a} &= \frac{l}{d \sin \alpha} f_B + \frac{1}{1-iy_{BQ}} \frac{K_Q}{\cos \alpha} \end{aligned} \right\} (4.9)$$

よって矩形緊張繫留浮体の波高伝達率、重心の水平運動振幅、繫留索に生じ張力変動の振幅は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} K_T &= \frac{y_{BQ}}{\sqrt{1+y_{BQ}^2}} \\ \left| \frac{l\theta}{a} \right| &= \frac{1}{\sqrt{1+y_{BQ}^2}} \frac{1}{|\sigma^2 - \omega_Q^2|} \frac{2\rho g d l^2}{I+I_1+I_2} f_{MQ} \end{aligned} \right\}$$

\* これは (4.8) 式において  $l_1 = l$  の条件を入れると文献 5) の (7.8)~(7.10) 式に完全に一致する。しかしながら同文献の計算例、図 7.2 および 7.3 は計算ミスにより結果が若干異なるので注意されたい。なお、 $\alpha \div 90^\circ$  の場合同文献 (7.12) 式のように簡単化されるが、第 3 項目の式は

$$\frac{K_Q}{\cos \alpha} = f_M + \frac{d+z_0}{l \left( 1 - \frac{\sigma^2}{\omega_D^2} \right)} \cdot f_H$$

と訂正されたい。

$$\left. \begin{aligned} \left| \frac{P_B}{\rho g d a} \right| &= \sqrt{\left( \frac{l f_B}{d \sin \alpha} - \frac{1}{1+y_{BQ}^2} \frac{K_Q}{\cos \alpha} \right)^2 + \left( \frac{y_{BQ}}{1+y_{BQ}^2} \frac{K_Q}{\cos \alpha} \right)^2} \\ \left| \frac{P_F}{\rho g d a} \right| &= \sqrt{\left( \frac{l f_B}{d \sin \alpha} + \frac{1}{1+y_{BQ}^2} \frac{K_Q}{\cos \alpha} \right)^2 + \left( \frac{y_{BQ}}{1+y_{BQ}^2} \frac{K_Q}{\cos \alpha} \right)^2} \end{aligned} \right\} (4.10)$$

#### 4.2 計算値による比較

円形と矩形断面の緊張繫留浮体を対象とし、その防波効果および繫留力について、まず計算値による比較を試みよう。ただし円形浮体としては水深 10m 地点に外径 10m の浮体を吃水 5m で設置するとした現地浮体を考えその張力振幅および波高伝達率については、断面積が等価な矩形固定浮体に置き換えた近似式を用いる。

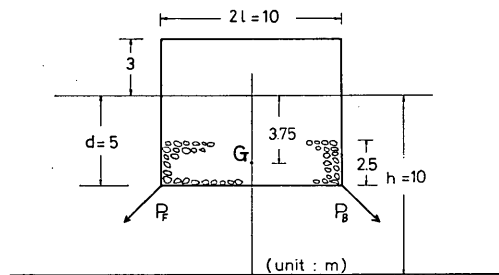


図 4.2 想定矩形断面現地浮体

次に、矩形浮体としては、図 4.2 に示すように幅 10m 高さ 8m の中空浮体を考え、浮体内部に 2.5m 厚さで砂利が填充されているとする。いま、簡単のため浮体外殻の重さを無視し、浮体重量はもっぱら内部の砂利で得られていると仮定すると、この浮体の単位幅当りの空中重量は 35t/m となる\*。ただし、砂利の単位体積重量を 1.4 t/m<sup>3</sup> とした。繫留されない場合の浮体の吃水 3.5m を繫留索により更に 1.5m 引張り込み吃水を 5m とする。

計算に必要な浮体諸元は次のとおりである。

- 浮体半幅  $l = 5\text{m}$
- 吃水  $d = 5\text{m}$
- 吃水 (非繫留時)  $d_0 = 3.5\text{m}$
- 重心 G の z 座標 (鉛直上向き正)  $z_0 = -3.75\text{m}$

\* 厚さ 10mm の一様鋼板で浮体を製作したとすると、その鋼板の重量は単位長さ当り約 3t/m となる。

円形断面緊張繫留浮体の防波効果と繫留力

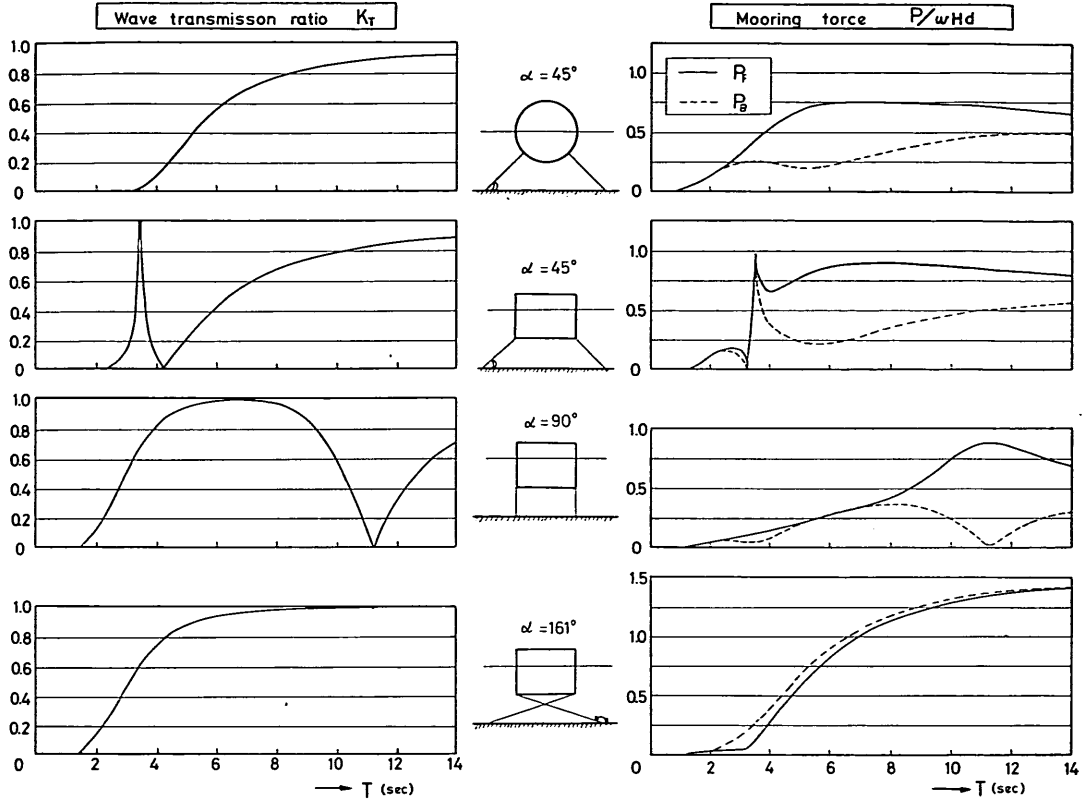


図 4.3 円形および矩形断面緊張繫留浮体の防波効果・繫留張力の比較

慣性モーメント  $I=49.6 \text{ t}\cdot\text{sec}^2$

以上の諸数値を用い、円形および矩形断面緊張繫留浮体の波高伝達率および張力振幅の計算結果を示したのが図 4.3 である。ただし、矩形断面浮体については繫留角度  $\alpha$  を  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $161^\circ$  に変えた 3 ケースについて行なっている。

まず、矩形断面浮体に限定し、波高伝達率の計算結果図からどの繫留法が防波堤として最適であるかを検討する。現地でも主に対象となる入射波周期  $T=4\sim 14$  秒の範囲での波高伝達率は、総合的に判断して  $\alpha=45^\circ$  の場合が最も小さい。そこで、円形浮体と  $\alpha=45^\circ$  の矩形浮体を比較すると、入射波周期 4 秒以上の波について、防波効果は矩形浮体の方が若干勝っており、一方、繫留張力の点からは円形浮体の方がやや小さいことがわかる。

4.3 実験値による比較

前節では、円形および矩形断面緊張繫留浮体の防波効果および繫留力について、専ら計算値による比較を試み

た。しかしながら既述のように、円形断面緊張繫留浮体に対する理論値あくまで近似式による推定値に過ぎず、定量的には必ずしも実験値と適合していなかった。また、矩形断面浮体についても、その理論値の妥当性については伊藤が繫留角度  $\alpha=90^\circ$  の場合についてごく大雑把に確かめているにすぎない<sup>9)</sup>。

ここでは、矩形断面緊張繫留浮体の波高伝達率、波による浮体重心の水平振幅、繫留索の張力振幅についての実験結果と既述の矩形断面緊張繫留浮体に定する理論値の比較、さらに、この実験値を円形断面緊張繫留浮体のそれと比較した結果について述べる。

(1) 実験諸元

実験に用いた鋼製中空 (4.5mm 厚鋼板製) 浮体の寸法は幅 60cm、高さ 40cm、長さ 47cm、上部に蓋がついたもので、浮体の諸元は次の通りである。

- 半幅  $l=30\text{cm}$
- 吃水 (非繫留)  $d_0=20.2\text{cm}$
- 底面から重心までの距離  $zd=20.5\text{cm}$



慣性モーメント (幅1cm):

$$I=0.86\text{kg}\cdot\text{sec}^2$$

なお、実測によるこの浮体の空中重量 56.4kg は、計算により求めた 57.1kg にほぼ一致する。

この浮体を用いて、水深  $h$  を 60 cm に固定し、入射波周期  $T$

を 1.6 秒から 3.2 秒まで変化させ図 4.4 に示す 3 種類の繋留角について、伝達波高、繋留索に生じる張力変動、

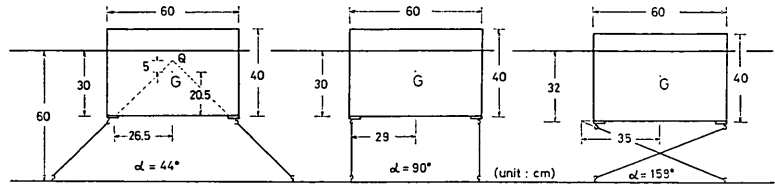


図 4.4 矩形断面緊張繋留浮体の実験

浮体重心の水平振幅又は浮体の回転振幅のそれぞれを測定した。なお、使用水路、張力測定法等については 2 に

表 4.1 矩形断面緊張繋留浮体の実験結果 ( $\alpha=44^\circ$ )

$T$ (sec)	$e$ (cm)	$H_t$ (cm)	$P_F$ (kg)	$P_B$ (kg)	$H_i$ (cm)	$2l\theta$ (cm)	$\frac{P}{wH_i, dB}$		$K_T$	$\frac{2l\theta}{H_i}$
							$P_F$	$P_B$		
1.6	3	3.1	3.8	1.0	1.3	0.9	1.8	0.44	0.42	0.12
	5	5.2	6.3	1.7	2.3		1.7	0.46	0.44	
	7	7.4	9.7	2.2	3.2		1.9	0.42	0.42	
1.72	3	3.4	4.3	1.3	1.8	1.0	1.8	0.54	0.51	0.12
	5	5.6	7.2	2.0	2.9		1.8	0.51	0.52	
	7	8.0	10.7	2.8	4.1		1.9	0.50	0.51	
1.8	3	3.4	4.0	1.2	1.8	0.8	1.7	0.50	0.53	0.10
	5	5.7	6.9	1.9	3.0		1.7	0.47	0.53	
	7	8.2	10.2	2.9	4.2		1.8	0.52	0.51	
2.0	3	3.5	4.6	1.7	2.4	0.7	1.7	0.69	0.67	0.08
	5	6.1	7.8	2.6	3.8		1.8	0.60	0.62	
	7	8.3	10.7	3.7	5.2		1.8	0.63	0.63	
2.2	3	4.0	5.8	1.6	2.6	0.9	2.1	0.57	0.65	0.10
	5	6.6	9.1	2.4	4.1		2.0	0.52	0.62	
	7	9.2	12.7	3.6	5.3		2.0	0.55	0.58	
2.4	3	3.4	4.4	1.8	2.5	0.7	1.8	0.76	0.74	0.08
	5	6.3	7.5	3.3	4.2		1.7	0.74	0.67	
	7	8.9	10.7	3.9	5.7		1.7	0.62	0.64	
2.6	3	3.4	3.7	2.5	2.6	0.6	1.5	1.0	0.76	0.08
	5	5.6	6.5	3.9	4.5		1.7	0.99	0.79	
	7	7.9	9.7	5.5	6.0		1.7	0.99	0.73	
2.7	3	3.2	3.6	2.4	2.5	0.6	1.6	0.94	0.78	0.07
	5	5.5	6.4	3.8	4.4		1.7	0.98	0.79	
	7	7.7	9.2	5.4	5.9		1.7	0.99	0.74	
2.8	3	3.2	4.1	2.2	2.5	0.5	1.8	0.98	0.77	0.06
	5	5.7	6.8	3.7	4.3		1.7	0.92	0.75	
	7	7.9	9.1	5.0	5.9		1.6	0.90	0.73	
3.0	3	3.3	4.2	1.9	2.4	0.6	1.8	0.82	0.73	0.08
	5	5.6	7.0	3.2	4.2		1.8	0.81	0.74	
	7	7.8	9.2	4.4	5.7		1.7	0.80	0.74	
3.2	3	3.2	4.1	1.9	2.6	0.6	1.8	0.84	0.81	0.08
	5	5.4	6.9	3.0	4.2		1.8	0.79	0.77	
	7	7.5	9.3	3.9	5.6		1.8	0.74	0.74	

円形断面緊張繫留浮体の防波効果と繫留力

示した円形浮体の実験と同じであるが、波高および浮体運動の振幅測定は全てものさしを用いた。

(2) 実験結果

各繫留法についての実験結果を表 4.1~4.3 に示す。  
表中  $e$  は造波機偏心,  $H_i$ : 入射波高,  $2P_F$ ,  $2P_B$ : 堤外

および堤以側繫留索に生じる張力全振幅,  $H_t$ : 伝達波高,  $2l\theta$ ,  $2\xi$ : 浮体の回転又は水平全振幅を表わす。また、張力、伝達波高、浮体変位については理論値との比較上無次元化した値も示している。

表 4.2 矩型断面緊張繫留浮体の実験結果 ( $\alpha=90^\circ$ )

$T$ (sec)	$e$ (cm)	$H_t$ (cm)	$P_F$ (kg)	$P_B$ (kg)	$H_t$ (cm)	$2\xi$ (cm)	$\frac{P}{wH_i dB}$		$K_T$	$\frac{2\xi}{H_i}$
							$\frac{P_F}{wH_i dB}$	$\frac{P_B}{wH_i dB}$		
1.6	1.5	1.5	1.1	0.9	1.4	2.1	0.99	0.84	0.93	1.4
	3	3.1	1.9	1.6	3.0	4.7	0.86	0.72	0.95	1.5
	5	5.2	3.2	1.8	5.0	8.0	0.83	0.49	0.96	1.5
1.72	1.5	1.7	1.3	0.9	1.5	2.3	1.1	0.74	0.91	1.4
	3	3.4	2.4	1.7	3.1	5.6	1.0	0.69	0.90	1.7
	5	5.6	4.1	2.7	5.1	9.1	1.0	0.63	0.91	1.6
1.8	1.5	1.7	1.3	1.0	1.4	2.8	1.1	0.85	0.85	1.7
	3	3.4	2.4	1.6	3.0	5.6	1.0	0.67	0.88	1.7
	5	5.7	4.0	2.8	5.0	9.5	0.99	0.69	0.88	1.7
2.0	1.5	1.7	1.7	0.9	1.3	3.3	1.4	0.76	0.77	1.9
	3	3.5	3.3	1.7	2.8	7.2	1.3	0.68	0.80	2.1
	5	6.1	5.8	3.3	4.9	11.6	1.4	0.76	0.81	1.9
2.2	1.5	1.9	2.3	1.3	1.3	5.4	1.7	0.96	0.68	2.9
	3	4.0	5.0	2.7	2.8	11.1	1.8	0.97	0.70	2.8
	5	6.6	7.5	4.8	4.6	16.5	1.6	1.0	0.70	2.5
2.4	1.5	1.8	2.3	0.9	0.7	6.0	1.8	0.68	0.39	2.8
	3	3.4	4.6	1.7	1.4	10.9	1.9	0.71	0.41	2.9
	5	6.3	8.5	3.9	3.1	15.6	1.9	0.89	0.49	2.5
2.6	1.5	1.6	2.1	0.6	0.3	3.9	1.8	0.55	0.19	2.4
	3	3.4	4.2	1.0	0.9	7.5	1.8	0.43	0.27	2.2
	5	5.6	7.1	2.9	2.4	14.0	1.8	0.74	0.43	2.5
2.7	1.5	1.6	2.0	0.6	0.3	3.3	1.8	0.53	0.19	2.1
	3	3.2	4.1	0.9	0.9	6.8	1.8	0.39	0.28	2.1
	5	5.5	7.1	2.7	1.9	13.3	1.8	0.70	0.33	2.4
2.8	1.5	1.8	2.1	0.7	0.4	3.9	1.7	0.53	0.22	2.2
	3	3.2	4.2	0.9	1.0	7.1	1.9	0.38	0.31	2.2
	5	5.7	7.7	2.4	2.0	12.7	1.8	0.60	0.35	2.2
3.0	1.5	1.7	2.2	0.6	0.5	4.2	1.8	0.61	0.29	2.4
	3	3.3	4.0	0.8	1.0	7.4	1.7	0.33	0.30	2.2
	5	5.6	7.0	2.9	2.0	12.8	1.8	0.74	0.36	2.3
3.2	1.5	1.6	2.0	0.7	0.6	4.1	1.8	0.68	0.38	2.6
	3	3.2	4.3	1.1	1.4	7.0	1.9	0.49	0.44	2.2
	5	5.4	6.5	2.8	2.3	12.7	1.7	0.72	0.43	2.4

表 4.3 矩形断面緊張繫留浮体の実験結果 ( $\alpha=158^\circ$ )

$T$ (sec)	$e$ (cm)	$H_i$ (cm)	$P_F$ (kg)	$P_B$ (kg)	$H_t$ (cm)	$2\xi$ (cm)	$\frac{P_F}{wH_i\Delta B}$	$\frac{P_B}{wH_i\Delta B}$	$K_T$	$\frac{2\xi}{H_i}$
1.6	1.5	1.5	1.70	1.66	0.87	1.45	1.61	1.57	0.87	0.97
	3	3.1	3.10	3.13	2.6	2.6	1.42	1.43	0.84	0.84
1.72	1.5	1.7	1.90	2.12	0.88	1.55	1.58	1.77	0.88	0.91
	3	3.4	3.67	3.71	3.05	3.4	1.53	1.55	0.90	1.00
1.8	1.5	1.7	2.14	1.83	0.79	1.6	1.78	1.52	0.79	0.94
	3	3.4	3.55	3.57	2.8	3.5	1.48	1.49	0.82	1.03
2.0	1.5	1.7	2.03	1.97	0.82	1.45	1.69	1.64	0.82	0.85
	3	3.5	4.26	4.07	3.3	4.2	1.73	1.65	0.94	1.20
2.2	1.5	1.9	2.63	2.17	0.97	3.3	1.96	1.62	0.97	1.76
	3	4.0	4.54	4.32	3.55	6.7	1.61	1.53	0.89	1.68
2.4	1.5	1.8	2.34	2.11	0.97	3.0	1.84	1.66	0.97	1.67
	3	3.4	5.10	4.87	3.1	6.2	2.13	2.03	0.91	1.82
2.6	1.5	1.6	2.39	2.45	0.88	1.9	2.12	2.17	0.88	1.19
	3	3.4	4.71	4.77	2.75	4.45	1.96	1.99	0.81	1.31
2.7	1.5	1.6	2.31	2.30	0.84	2.6	2.05	2.04	0.84	1.63
	3	3.2	4.84	4.72	2.95	5.0	2.14	2.09	0.92	1.56
2.8	1.5	1.8	2.47	2.24	0.83	3.3	1.94	1.77	0.83	1.83
	3	3.2	5.01	4.70	3.05	6.0	2.22	2.08	0.95	1.88
3.0	1.5	1.7	2.23	2.06	0.91	4.6	1.86	1.72	0.91	2.71
	3	3.3	4.65	4.30	3.1	8.2	2.00	1.85	0.94	2.48
3.2	1.5	1.6	1.78	2.36	1.0	5.0	1.58	2.09	1.0	3.13
	3	3.2	3.98	4.12	2.85	8.7	1.76	1.83	0.89	2.72

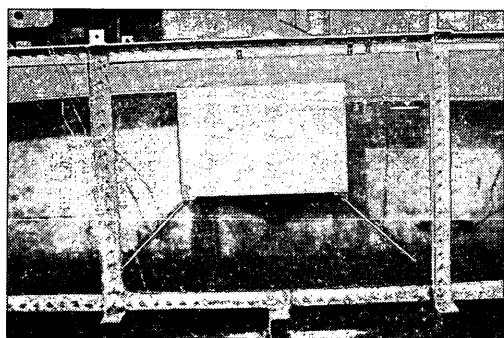


写真 2 矩形断面緊張繫留浮体 ( $\alpha=44^\circ$ )

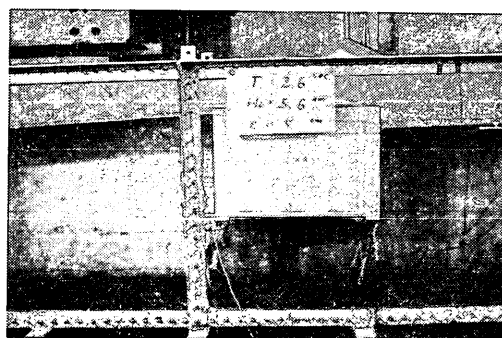


写真 3 矩形断面緊張繫留浮体 ( $\alpha=90^\circ$ )

図 4.5 は  $\alpha=44^\circ$  のケースについて実験値と理論値を比較したもので、実験を行なった入射波周期1.6~3.2秒の範囲では、理論値はかなり良く実験値に合致する。ここで実験値は各入射波周期ごとに無次元化した値の平均

をとってある。このケースでは、浮体は波の作用を受けてもほとんど動揺しなかった。写真-2は浮体に波の山が作用したときの状況を示したものである。

$\alpha=90^\circ$  の場合の理論値と実験値の比較を 図 4.6 に示

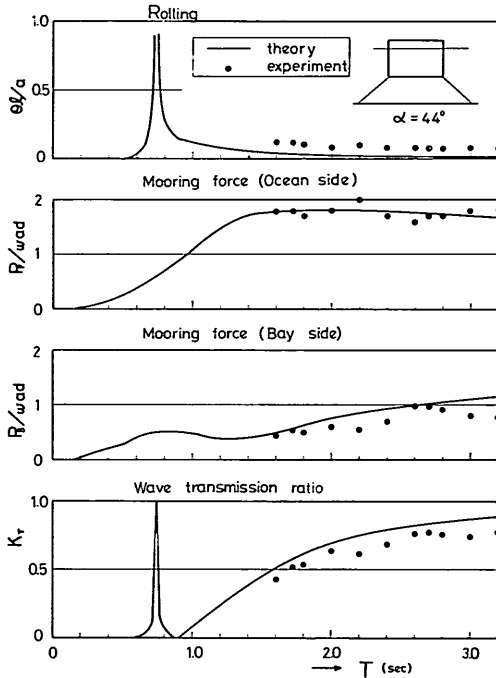
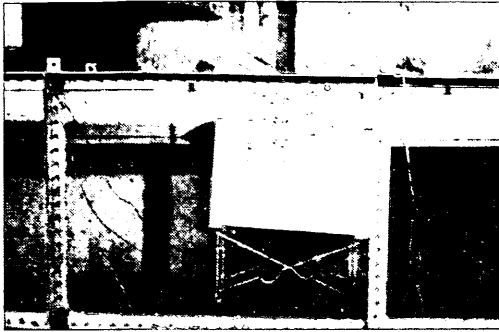


図 4.5 実験値と理論値の比較 (α = 44°)

す。浮体の水平振幅についての理論値は実験値より顕著なピークの出現を示しているが、張力および波高伝達率については理論値と実験値は良く合っている。このケースでは、浮体は波の作用により大きな水平運動を生じた (写真-3)。

最後に α = 158° の場合の理論値と実験値の比較を示したのが図 4.7 で、α = 90° の場合と同様、水平振幅が定量的にかなり異なっているが、張力および波高伝達率については理論値と実験値は比較的よく合っている。このケースについても、浮体は波によりかなりの動揺を生じた。写真-4は波の作用により浮体が傾いた状況を撮したものである。また、図 4.8 は実験において測定した張

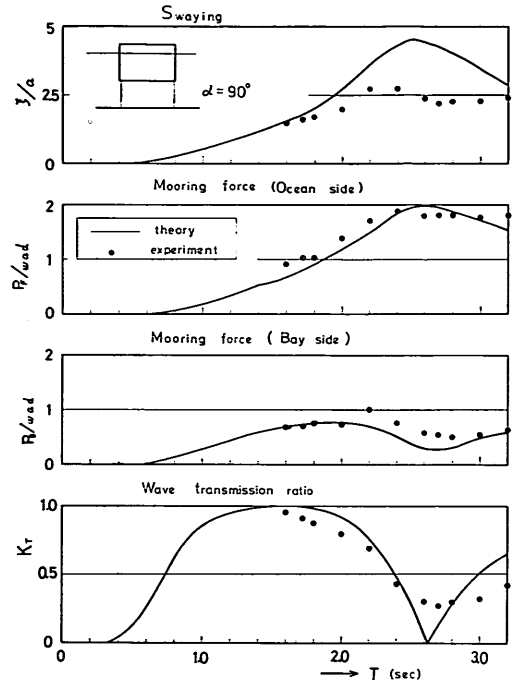


図 4.6 実験値と理論値の比較 (α = 90°)

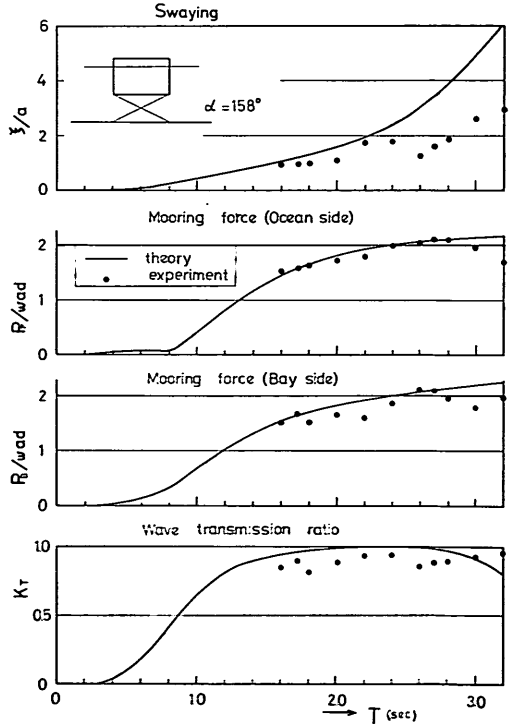


図 4.7 実験値と理論値の比較 (α = 158°)

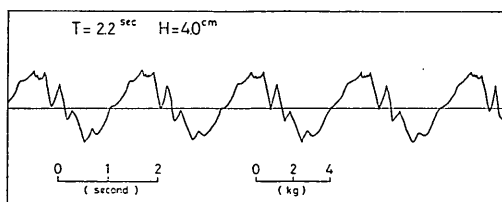


図 4.8 測定張力記録例 ( $\alpha = 158^\circ$ )

力の時間的変動を示したもので、張力はもはや正弦的ではなく、かなり不規則な変動を示している。

以上の理論値と実験値の比較の結果をまとめると、浮体の水平ないし回転変位は定量的にかなり食い違っている所もあるが、定性的な傾向は似ていること、張力および波高伝達率については定量的にも理論値と実験値は良く合うことなどから判断して、4.1で述べた矩形断面緊張繫留浮体に対する理論値の妥当性はほぼ証せられたといえよう。ただし、かなり短い入射波周期 ( $T < 1.6$  秒) についての実験は行なっていないので、こうした領域での理論の妥当性については別途実験的に確める必要がある。

次に、円形断面および矩形断面緊張繫留浮体の実験による直接的な比較を試みる。矩形浮体としては、防波効果の見地から  $\alpha = 44^\circ$ 、すなわち表 4.1 の結果をとる。いま、矩形浮体の実験が仮に縮尺 1/16.7 で行なわれたとすると、現地浮体は水深10m地点に幅10mの矩形浮体が吃水5mで設置されてることになる。

一方、2で述べたように、円形断面緊張繫留浮体の実験ケース1は、水深10m地点に外径10mの浮体を吃水5mで設置すると仮定した現地浮体の  $1/20$  の縮尺と考え、実験における入射波周期を決定した。すなわち、両浮体とも上記の縮尺をそれぞれ仮定することにより、水深10m地点に幅ないしは外径10mの浮体を吃水5mで緊張繫留する場合に相当し直接的な比較が可能である。

表 4.4 は円形断面および矩形断面緊張繫留浮体の波高伝達率および無次元化した張力振幅の実験結果を比較したものである。表から、円形断面と矩形断面浮体を比較してみると、防波効果については若干矩形浮体が勝り、作用張力の観点からは逆に円形浮体の方が勝っていることが分る。

なお、円形および矩形浮体をその断面からみると、周長は円形が約 31.4m、矩形が 33.3m、静水面から天端までの高さは、円形が 5m、矩形が 1.7m となり、防波堤としては円形の方が望ましいと思われる。

## 5. 改良型円形浮体

### 5.1 考え方

すでに 3.3 で述べたように、円形断面緊張繫留浮体を矩形浮体で置き換えた近似式で考えるかぎり、外径10mの円形浮体を水深10m地点に設置すると仮定して、入射波周期が7秒以上になると浮体には水平力よりむしろ揚圧力が卓越する。一方、浮体の防波効果は、ある一定の入射波周期のもとで浮体幅および吃水に関係することが

表 4.4 円形および矩形断面浮体の比較

$T_p$ (sec)	円 形 $S (1/20)$				矩 形 $S (1/16.7)$			
	$T_m$	$K_T$	$P_F/wHd$	$P_B/wHd$	$T_m$	$K_T$	$P_F/wHd$	$P_B/wHd$
7	1.57	0.51	0.74	0.25	1.72	0.51	0.91	0.26
9	2.01	0.72	0.75	0.35	2.21	0.55	1.00	0.28
11	2.46	0.78	0.75	0.35	2.70	0.77	0.83	0.49
13	2.91	0.86	0.63	0.38	3.19	0.79	0.90	0.40
15	3.35	0.86	0.68	0.44	3.68			

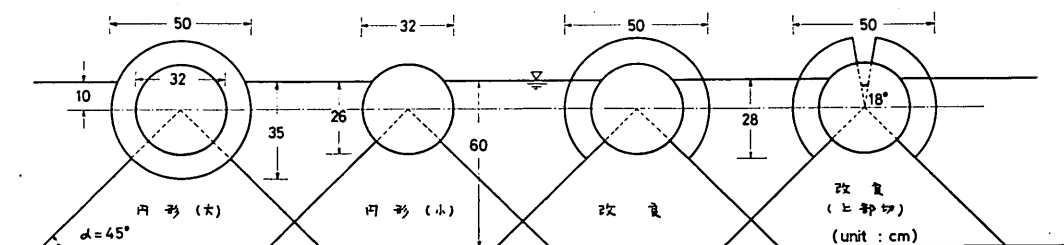


図 5.1 改良型円形浮体の実験

円形断面緊張繫留浮体の防波効果と繫留力

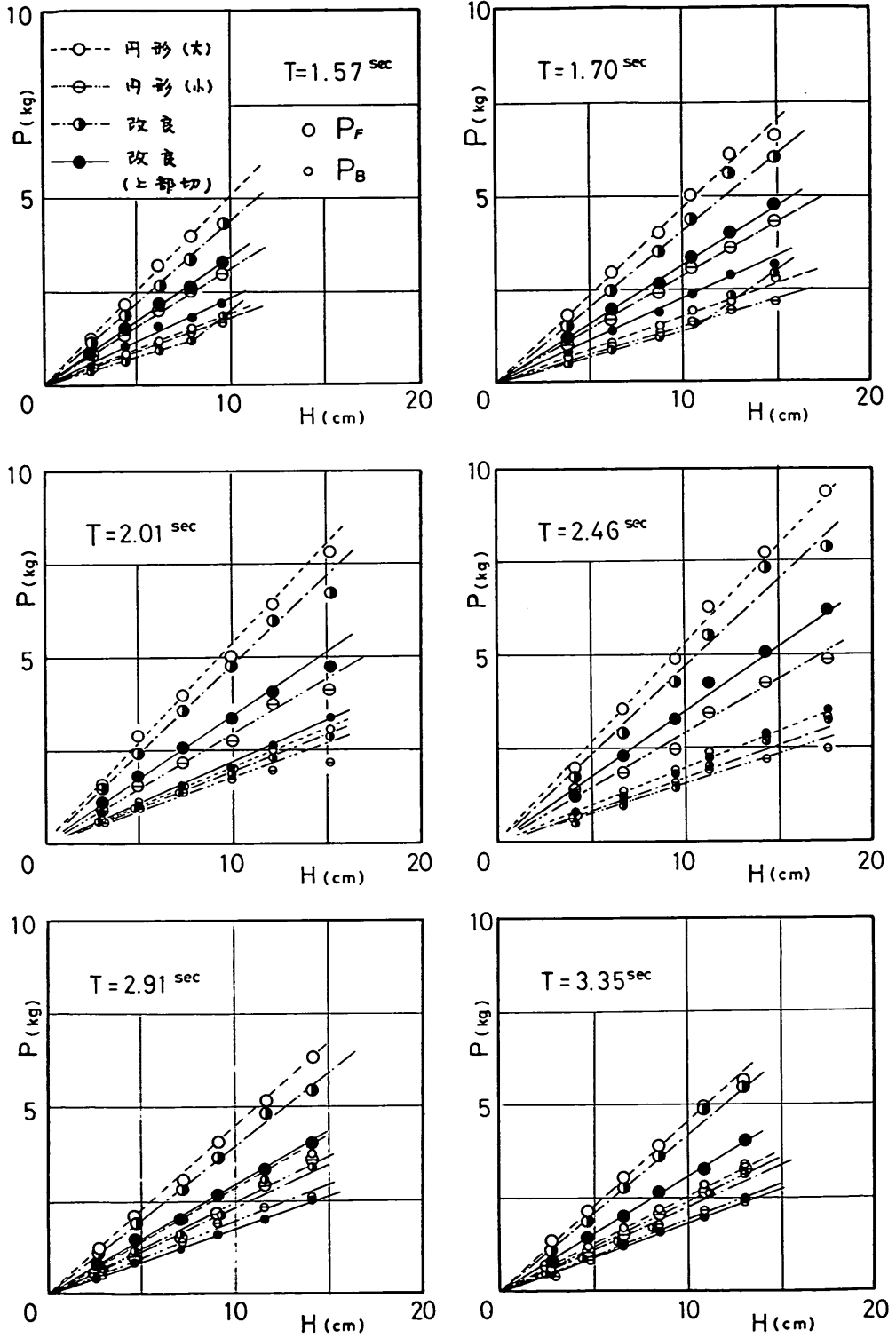


図 5.2 入射波高に対する張力振幅

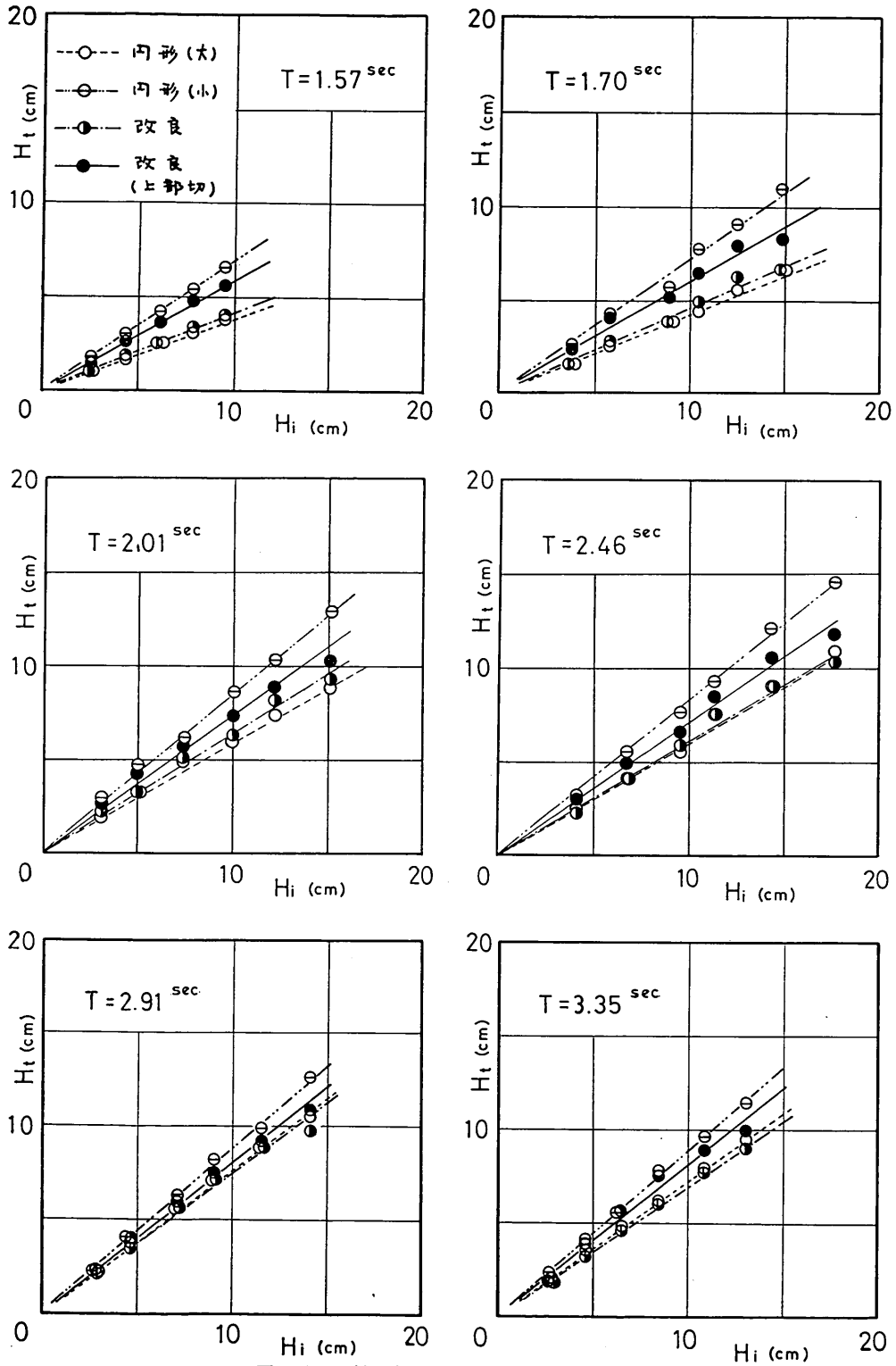


図 5.3 入射波高に対する伝達波高

容易に確められる。

そこで、改良型円形浮体としては、できる限り防波機能を損わず浮体に作用する揚圧力を減らす目的で、円形断面の下部  $1/4$  を切り取ったものを基本型とした。その理由は、揚圧力の大半がこの部分に作用すると考えたからである。すなわち、鉛直方向への投影面積では、円の下部  $1/4$  が占める面積割合は70%に及ぶ。一方、この部分を切り取ることによる吃水への影響は30%小さくなるに過ぎない。

なお、この改良型のうち、浮体上部に空気抜き用の切り欠きを設けた断面を、設けない断面と区別するため、改良型（上部切）と称することにする。こうした改良型円形浮体は、浮体内の中空体によって浮力を得、浮体を緊張繫留する。

5.2 改良型円形浮体の実験—円形浮体との比較

上に述べた2種類の改良型円形浮体の防波効果および繫留索に生じる張力を通常の円形断面浮体と比較する目的で、図5.1に示すケースについて実験を行なった。通常の円形断面浮体としては、外径50cmと32cmの2種類の浮体を用いた。これらを改良型浮体と区別するため、今後は円形（大）と円形（小）とそれぞれ略称することにする。

実験条件は、2で述べたケース2と同じく水深を60cmの一定とし、各断面ともに浮体中心が静水面下10cmになるようにセットした（図5.1参照）。なお、入射波周期および波高についてもケース2と同じものを用いた。

図5.2は繫留索の張力振幅と入射波高の関係を各周期別にプロットしたもので、図5.3は入射波高に対する伝達波高の関係を示している。

これらの図から、大略的に次のような傾向がわかる。まず、堤外側の張力振幅  $P_F$  については円形（小）が最低で、改良（上部切）、改良、円形（大）の順になっている。一方、伝達波高はこれと逆に円形（大）が最も小さく、次いで改良、改良（上部切）、円形（小）の順である。こうした関係をより明確に把握するため、得られた実験結果を図のように直線で近似し、無次元化して比較を試みる。

図5.4は無次元化した張力振幅値、図5.5は波高伝達率についてそれぞれ各種断面の比較を行なったもので、併せて円形（大）に対する近似理論値も示してある。まず張力振幅の結果について見ると、一般に大きな張力が作用する堤外側の繫留索については、改良型は共に円形（大）より張力が小さく、特に上部に空気抜きの切り欠

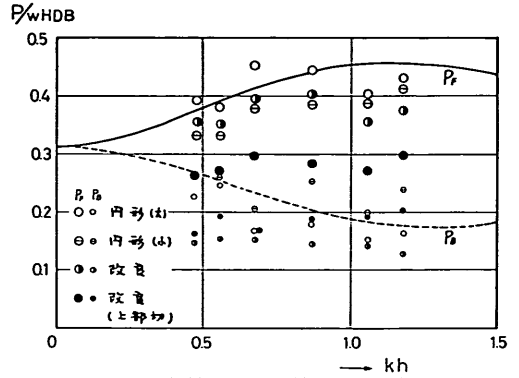


図 5.4 各種断面の比較（張力振幅）

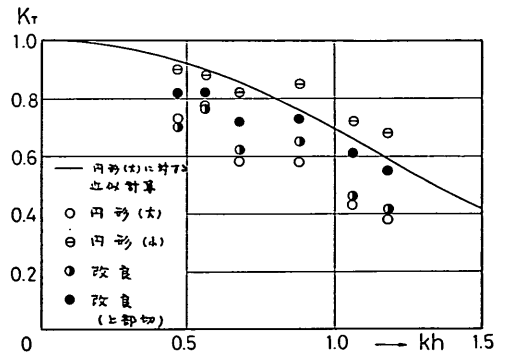


図 5.5 各種断面の比較（波高伝達率）

きを設けた浮体では、波浪による張力変動をかなり減らすことができる。すなわち、揚圧力を減らすため浮体の下部  $1/4$  を切除した効果が顕著に現われている。堤内側の繫留索に生じる張力については、これほど顕著ではないが、長周期性の波に限って考えると、改良（上部切）は円形（大）に比し張力はかなり小さい。

ここで注意すべきことは、図5.2の実測値において円形（小）の張力振幅は、改良（上部切）より小さいにもかかわらず、無次元化した値が大きくなって現われていることである。その理由は、測定張力を浮体外径  $D$  で割って無次元化する際、円形（小）のみ  $D=32\text{cm}$  と他のケース50cmより小さいため、測定張力自体としては小さいにもかかわらず、無次元化した結果としての値が大きくなって現われているからである。

次に、波高伝達率についていえば、円形（大）および改良はほぼ同程度に小さく、次いで改良（上部切）、円形（小）の順になっている。

円形と改良を比較する上において、量的な概念をより明確にするためめ次のような操作を施した。円形（大）を1として、他の3つの浮体の測定張力振幅（無次元化



表 5.1 円形（大）に対する各断面の張力，波高伝達比

T (sec)	円形（大） $P_F, P_B, K_T$	円形（小）			改 良			改 良（上部切）		
		$P_F$	$P_B$	$K_T$	$P_F$	$P_B$	$K_T$	$P_F$	$P_B$	$K_T$
1.57	1.0	0.61	0.95	1.74	0.86	0.79	1.08	0.69	1.26	1.53
1.70	1.0	0.61	0.83	1.63	0.88	0.92	1.12	0.67	1.25	1.42
2.01	1.0	0.55	0.90	1.39	0.90	0.81	1.07	0.64	1.05	1.23
2.46	1.0	0.53	0.78	1.33	0.86	0.90	1.03	0.65	1.00	1.20
2.91	1.0	0.56	0.67	1.10	0.93	0.83	0.95	0.72	0.78	1.03
3.35	1.0	0.56	0.74	1.22	0.94	0.87	1.00	0.70	0.72	1.11
平均	1.0	0.57	0.91	1.40	0.90	0.85	1.04	0.68	1.01	1.25

しないもの）および波高伝達率を各入射波周期別に比率で示したのが表 5.1 である。ごく大雑把に、各断面浮体別に全入射波周期の平均値と比較すると、次のようにいえる。ただし、簡単のため議論を堤外側繫留索に生じる張力変動  $P_F$  と波高伝達率  $K_T$  のみに絞る。

円形（小）は円形（大）に比し、張力を40%余り減らし得るが、防波効果は逆に40%程度悪くなって、通常の防波堤としては不適當であろう。改良は張力を10%程度減らし得るが、防波効果は逆に4%程度悪くなる。改良（上部切）は、30%程度張力を減らす代わりに、防波効果は25%程度悪くなる。

以上の結果から、円形断面下部  $1/4$  を切り取った改良型円形浮体、特に改良（上部切）は通常の円形浮体に比し、波浪による繫留索の張力変動をかなり減じ得ることが判った。しかしながら他方では、この改良型浮体は通常の円形浮体に比し、防波機能は落ちる。そこで、より防波効果を高めるため、改良（上部切）を更に水中深く引張り込んだ実験を行なった。すなわち、図 5.6 に示すように改良（上部切）の浮体中心を静水面下 16cm になるよう設置して（図 5.1 のケースから、さらに 6cm ばかり水中に引張り込んだ）実験を行ない、その結果を既述の円形（大）のそれと比較したのが表 5.2 である。こ

表 5.2 円形（大）と改良（上部切）の比較

h (cm)	D (cm)	T (sec)	L (cm)	円形（大）			改良（上部切）		
				$P_F$	$P_B$	$K_T$	$P_F$	$P_B$	$K_T$
60	50	1.57	319	0.43	0.16	0.38	0.36	0.21	0.15
		1.70	355	0.40	0.15	0.43	0.37	0.22	0.38
		2.01	436	0.45	0.18	0.61	0.31	0.25	0.62
		2.46	550	0.46	0.17	0.60	0.30	0.25	0.63
		2.91	671	0.38	0.24	0.80	0.30	0.26	0.77
		3.35	778	0.39	0.23	0.72	0.29	0.20	0.76

（注） $P_F, P_B$  については  $P/wHDB$  の無次元値で示されている。

の表から、次のことが分る。

まず、波高伝達率  $K_T$  を見ると、比較的入射波周期の短い領域において、改良（上部切）は円形に比し若干小さくなる傾向が見られるが、周期が長くなると同程度ないしは若干大きくなるようである。一方、堤外側繫留索に生じる張力  $P_F$  は全領域にわたって改良が小さく、逆に堤内側繫留索に生じる張力  $P_B$  は改良の方が大きい。 $P_B$  と  $P_F$  を加えた合計においては、全般的に改良が小さく、特に周期が長くなると改良型の効果は大きい。

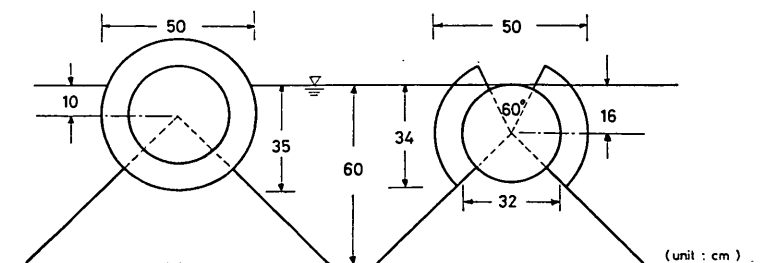


図 5.6 円形浮体と改良型浮体の比較実験

6. 現地波に対する検討

本章では今まで述べてきた実験的、理論的な成果を用いて、円形断面緊張緊留浮体ないしは改良型浮体を現地に適用した場合の防波効果および浮体緊留について若干の考察を行なう。ただし、問題の取り扱い易さの点から、専ら円形断面緊張緊留浮体を対象とした近似値を用い、適当に実験値による補正を加えることとする。

6.1 近似理論による張力振幅・波高伝達率の算定図

円形断面緊張緊留浮体の現地波に対する検討に便利のように、3.3 で述べた近似理論による計算結果を図示する。図 6.1~6.3 は浮体外径の水深に対する比をパラメータとして、浮体中心が静水面に一致する場合の張力振幅および波高伝達率を示したものである。図 6.4 は水深と浮体外径が等しい場合について、張力に及ぼす潮位の影響を推定するための図である。

6.2 円形断面緊張緊留浮体の防波効果

(1) モデル海岸における浮体の防波効果

実際に現地海岸で円形断面緊張緊留浮体が使用される場合に、この浮体設置によって浮体背後の水域がどの程度静穏になるかを現地波の記録に基づいて推定してみる。波浪観測台帳から或る海岸における半年間の日最高有義波(182個)を抽出し、有義波高および周期の関係をプロットしたのが図 6.5 である。この波高計は10m水深に設置されているので、こうした波のデータを外径10mの円形浮体が水深10mの地点に吃水5mで設置されている現地浮体に対する入射波とみなし、伝達波高を算出する。ただし簡単のため、波は有義波周期および波高をもった規則波として取り扱い、波向は浮体法線に直角で浮体端からの回折波、潮位変化なども考慮しない。

図 6.6 は近似式を用いて計算した伝達波の波高と周期の関係をプロットしたもので、入射波に比し全般的に波高が小さくなっていることが分る。図 6.7 は入射波および伝達波の波高の頻度分布を示したもので、浮体設置に

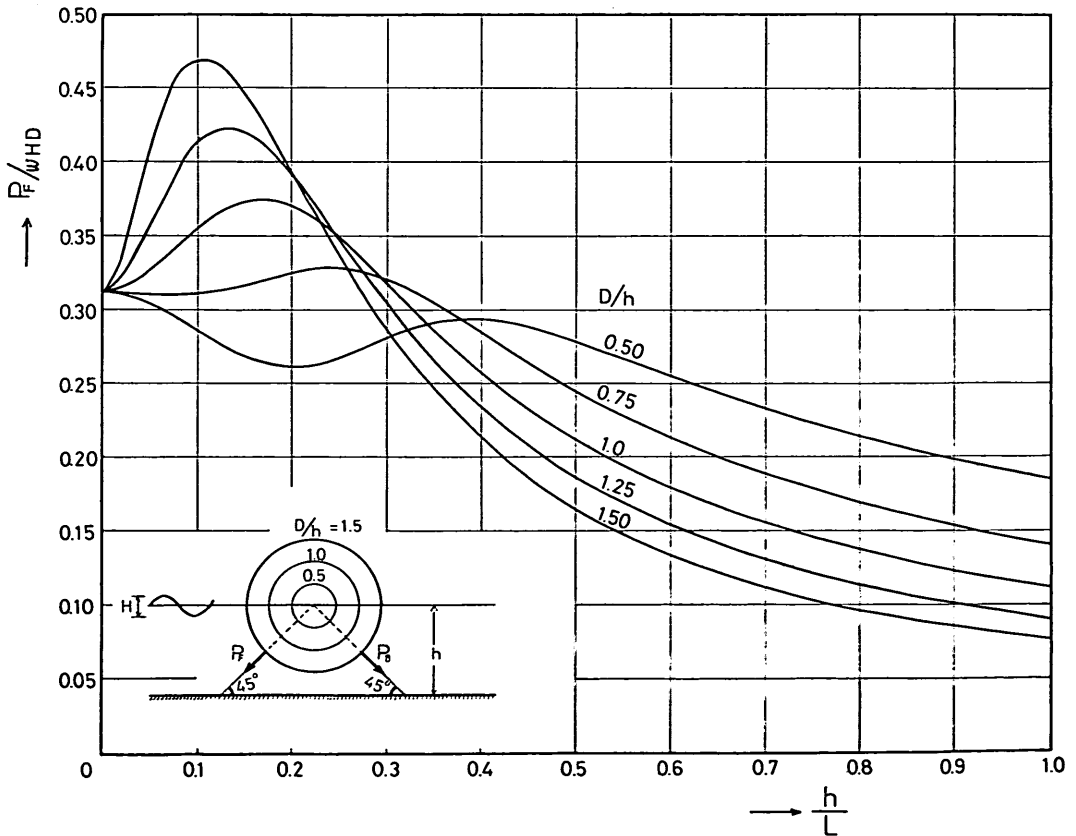


図 6.1 堤外側張力振幅算定図

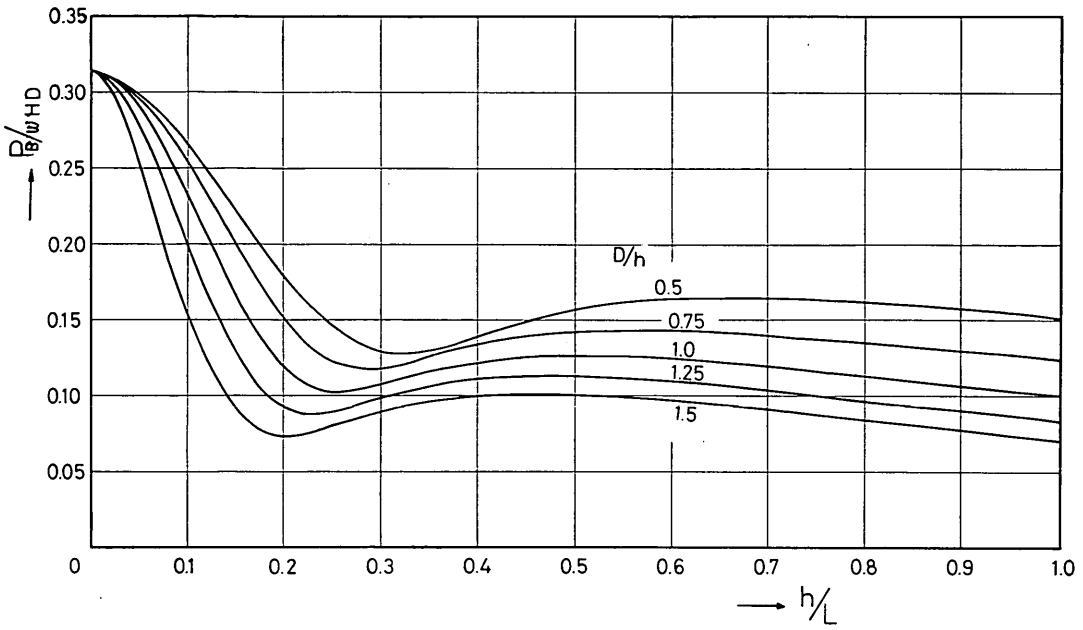


図 6.2 堤内側張力振幅算定図

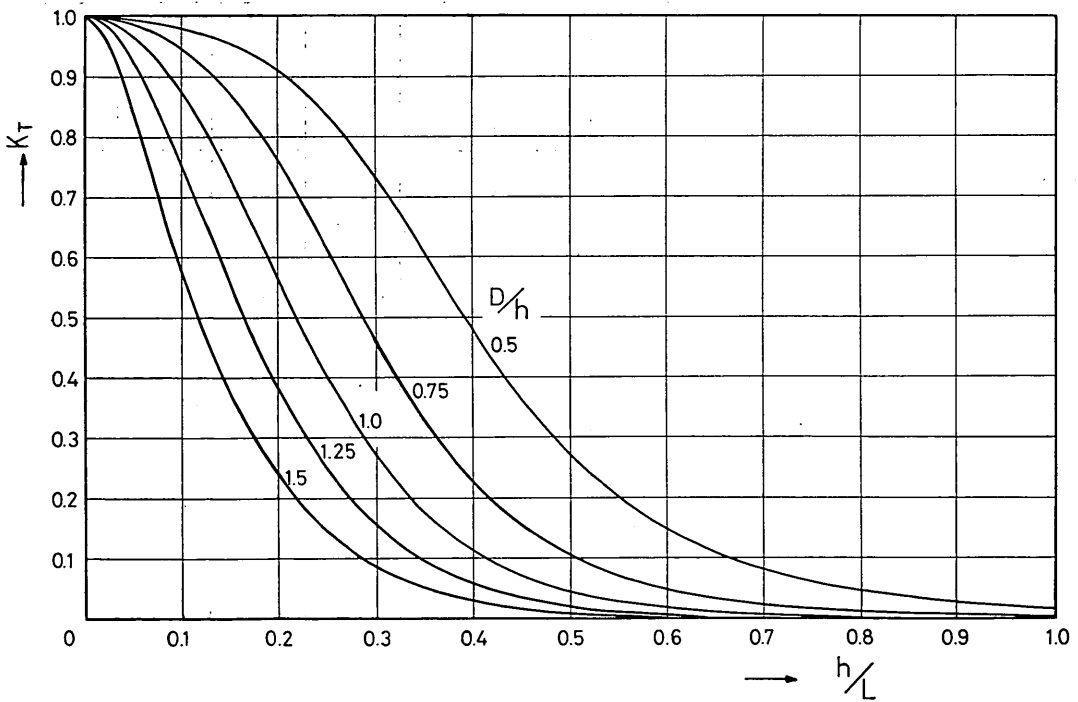


図 6.3 波高伝達率算定図

円形断面緊張繫留浮体の防波効果と繫留力

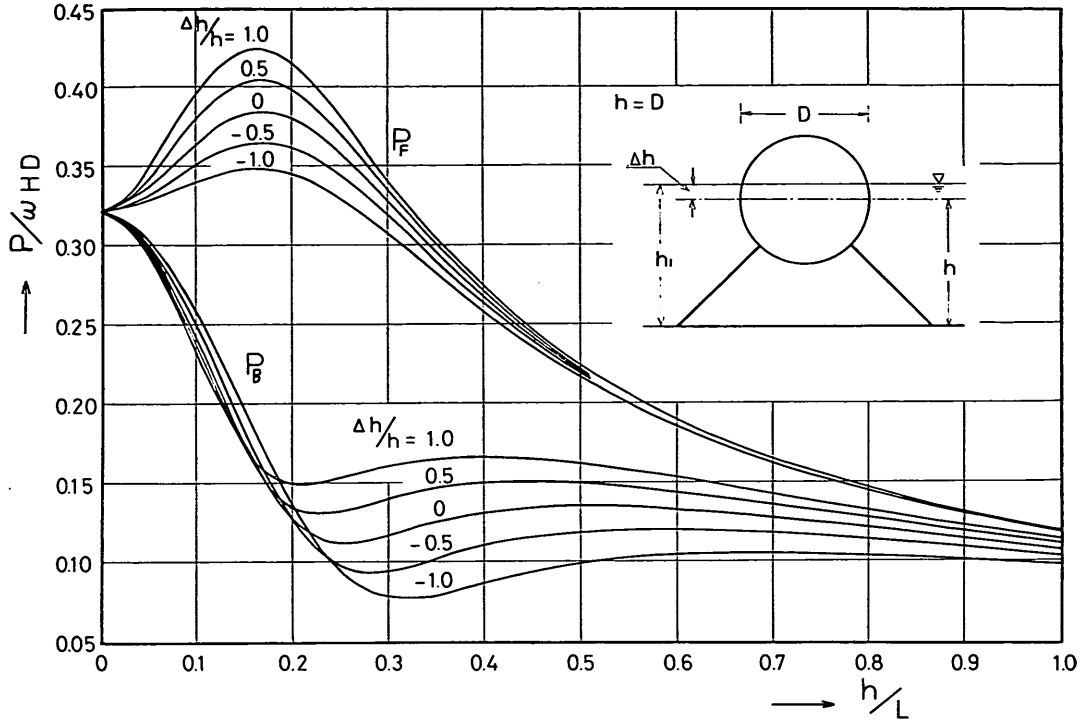


図 6.4 潮位変化による張力振幅算定図

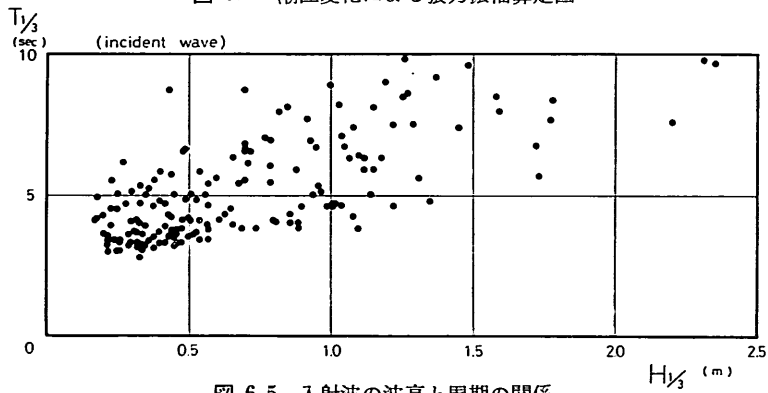


図 6.5 入射波の波高と周期の関係

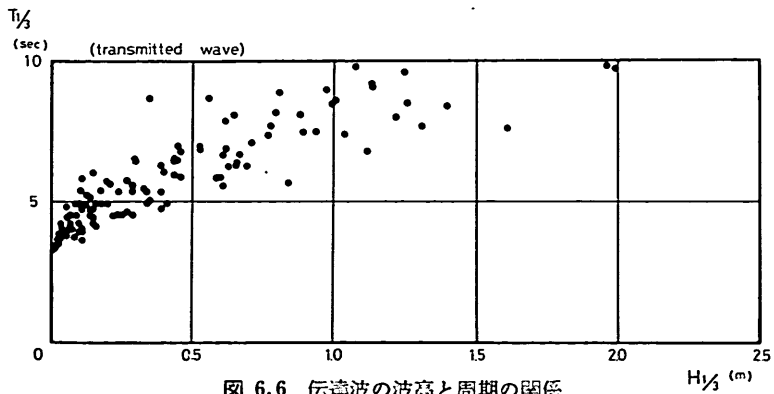


図 6.6 伝達波の波高と周期の関係

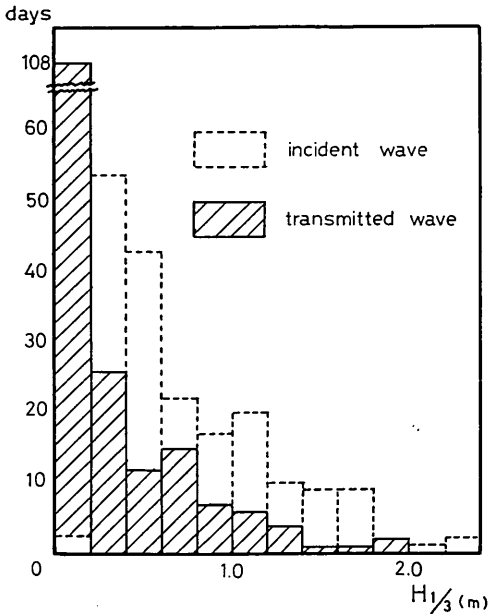


図 6.7 入射波と伝達波の波高頻度分布

より波高 20cm 以下の静穏となる日が、設置前の 3 日から設置後は 108 日程度と大幅に増大することがわかる。

なお、これらは近似式による計算値であって、実験値は計算値より波高伝達率がかなり小さいことから、実質的には静穏となる日はこれより増大することが予想される。

(2) 不規則波に対する防波効果

現地海岸に見られる波は、波高・周期・波の来襲方向とも時間的に不規則な変動をなす不規則波である。ここでは、不規則波に対する浮体の防波効果についての考え方をエネルギースペクトル法を用いた計算例により示す。ただし、不規則波は波高・周期のみが時間的に変化する周波数スペクトルとして表わす。

波の周波数スペクトルとして、たとえば Bretschneider の式を採用すると、入射波のエネルギースペクトルは次のように表わされる。

$$S(f) = \frac{3.45}{8} \frac{\bar{H}^2}{\bar{T}^4 f^5} \exp\left\{-\frac{0.675}{(\bar{T}f)^4}\right\} \quad (6.1)$$

ここで

$\bar{H}$ : 平均波高 (m)

$\bar{T}$ : 平均周期 (sec)

$f$ : 周波数 (sec<sup>-1</sup>)

(6.1) 式で与えられるスペクトルを波の全周波数につ

いて積分した値は、有義波高  $H_{1/3}$  と次のような関係がある。

$$H_{1/3} = 1.60\bar{H} = 4.00\sqrt{\int_0^\infty S(f)df} \quad (6.2)$$

また、平均周期  $\bar{T}$  と有義波周期  $T_{1/3}$  の間には、ほぼ次のような関係があることが示されている。

$$\bar{T} = 0.9T_{1/3} \quad (6.3)$$

以上の諸元から、入射波の有義波高および有義波周期が与えられると入射波のエネルギースペクトルが計算される。一方、伝達波のスペクトルは、周波数  $f$  における浮体の波高伝達率を  $K_T(f)$  として、次式で与えられる。

$$S_i(f) = [K_T(f)]^2 \cdot S_i(f) \quad (6.4)$$

ここに、添字  $i$  は伝達波、 $i$  は入射波を表わす。円形浮体を矩形固定浮体で置き換えた近似式を用いることにより、或る周波数  $f$  での波高伝達率  $K_T$  が求まる。この  $K_T$  を (6.4) に代入することにより、伝達波のスペクトルが計算され、次いで (6.2) 式から伝達波の有義波高を求めることができる\*。

いま、水深 10m 地点に外径 10m の浮体が吃水 5m で設置されていると仮定した現地浮体に  $H_{1/3} = 2$  m,  $T_{1/3} = 7$  秒の波が作用する場合の入射波および伝達波のエネルギースペクトルを計算したのが図 6.8 である。この場合伝達有義波高  $(H_{1/3})_t$  は 1.16m となり、入射有義波高に対する波高伝達率 0.58 は規則波の計算波高伝達率 0.68 より 15% 程度小さい。

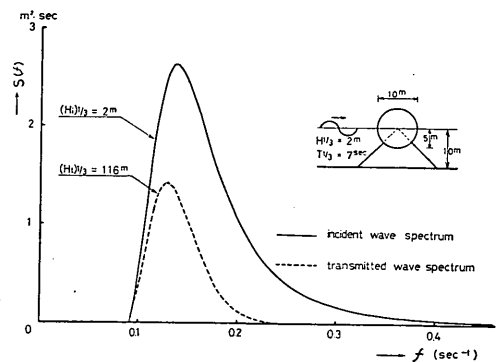


図 6.8 入射波および伝達波のエネルギースペクトル

\* 詳しい計算法等については、たとえば文献 7) を参照されたい。

6.3 浮体繫留

円形断面緊張繫留浮体をいかに繫留するかについては非常に重要な問題であり、別途研究する必要がある。ここでは、いままでに得られた繫留張力に関する理論的、実験的成果を用いて、浮体を繫留するにはどの程度の繫留装置が必要であるかを推定してみる。ただし、現地海岸の入射波および潮位に対する諸元には次のような制限を設けるものとする。

- 水深  $h=10\text{m}$
- 最大波高  $H_{\text{max}}=3\text{m}$
- 最大周期  $T_{\text{max}}=12\text{sec}$
- 最大潮位変動  $\Delta h=\pm 0.5\text{m}$

また、円形浮体としては外径10mの浮体をその中心が静水面に一致するよう、改良型は実験値を用いる関係上これよりやや小さい外径8.3mの浮体をその中心が静水面下2.7mになるよう設置するものとする(図6.9参照)。

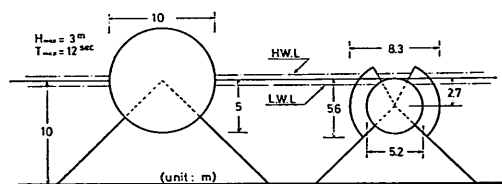


図 6.9 円形浮体と改良型浮体の現地モデル

(1) 繫留索に生じる最大張力

繫留索に生じる最大張力は初期張力に波による張力振幅を加えたものとする。初期張力はどの潮位においても繫留索にたるみを生じないという条件から、常に各潮位における張力振幅以上でなければならない。また、潮位の変動は浮体の浮力の変化となって現われ、繫留索の初期張力に影響を及ぼす。以上のことを考慮して円形および改良浮体の堤外、堤内側繫留索に生じる浮体長1m当りの最大張力を決定する。

a) 円形断面浮体

円形断面浮体に対する計算結果(図6.4)より求めた各潮位での張力振幅を一括して表6.1に示す。潮位変動に

対する繫留索の初期張力の変化を計算すると、潮位変動0.5mに対する浮力の変化 $\Delta V$ は図6.9の円形浮体に対しては近似的に

$$\Delta V \doteq w_0 D \Delta h = 5\text{t/m} \quad (6.5)$$

で表わされ、この浮力変化が繫留索の初期張力の変化となって現われる。すなわち、堤外および堤内側繫留索の初期張力の変化 $\Delta P_0$ は次式で与えられる。

$$\Delta P_0 = \Delta V / 2 \sin 45^\circ = 3.5\text{t/m} \quad (6.6)$$

潮位変化0のときの繫留索の所要初期張力を $P_0$ すると、潮位変化 $-0.5\text{m}$ に対しても繫留索にたるみを生じさせないためには、

$$\left. \begin{aligned} P_0 - \Delta P_0 &\geq (P_F)_{\Delta h = -0.5} \\ \therefore P_0 &\leq \Delta P_0 + (P_F)_{\Delta h = -0.5} = 14.6\text{t/m} \end{aligned} \right\} (6.7)$$

となる。ただし、 $(P_F)_{\Delta h = -0.5}$ は潮位変化 $\Delta h = -0.5\text{m}$ における堤外繫留索の張力振幅を表わす。

初期張力については、堤外および堤内側繫留索ともに同じ力が必要であると仮定し、これら両索に生じうる最大張力を求めると、

$$\left. \begin{aligned} (P_F)_{\text{max}} &= P_0 + \Delta P_0 + (P_F)_{\Delta h = 0.5} \geq 30.4\text{t/m} \\ (P_B)_{\text{max}} &= P_0 + \Delta P_0 + (P_B)_{\Delta h = 0.5} \geq 24.3\text{t/m} \end{aligned} \right\} (6.8)$$

となる。すなわち、浮体長1m当り堤外側繫留索には最大30.4t、堤内側繫留索には24.3tの張力が作用し、潮位0のときの繫留索の所要初期張力 $P_0$ は共に14.6t/mである。

b) 改良型浮体

改良型浮体(上部切)に対する近似式は得られていないので、ここでは表5.2に示した実験結果をもとに繫留索に生じる最大張力を算定する。表6.2は表5.2に示した実験結果を縮尺1/16.7として現地換算し、浮体外径8.3m、波高3mに対する繫留索の張力振幅を計算したものである。潮位変化に対する実験は行っていないので円形浮体に対する計算値を参考に推定する。

表 6.1 各潮位での張力振幅

$H$ (m)	$D$ (m)	$\Delta h$ (m)	$\Delta = \Delta h/D$	$P_F/wHD$	$P_F$ (t/m)	$P_F/wHD$	$P_B$ (t/m)
3	10	-0.5	-0.05	0.37	11.1	0.23	6.9
		0	0	0.39	11.7	0.24	7.2
		+0.5	+0.05	0.41	12.3	0.24	7.2

表 6.2 改良型浮体実験結果の現地換算値

h (m)	D (m)	T (sec)	L(m)	$P_F$ (ton)	$P_B$ (ton)	$K_T$
10	8.3	6.4	53.1	9.0	5.25	0.15
		6.9	59.1	9.25	5.50	0.38
		8.2	72.6	7.75	6.25	0.62
		10.0	91.6	7.50	6.25	0.63
		11.9	111.6	7.50	6.50	0.77
		13.7	130.0	7.25	5.0	0.76

まず潮位変動  $\Delta h=0$  のとき、繫留索に生じる張力振幅を表 6.2 の最大値に若干の余裕を見込んで  $P_F \doteq 10\text{t/m}$ 、 $P_B \doteq 7\text{t/m}$  と決定する。次に、潮位変動  $\Delta h = \pm 0.5\text{m}$  に対する張力変化は表 6.1 に示した円形浮体におけるそれと同じ比率で増減すると仮定すれば、

$$\left. \begin{aligned} (P_F)_{\Delta h=-0.5} &= 10 \times \frac{0.37}{0.39} = 9.5\text{t/m} \\ (P_B)_{\Delta h=-0.5} &= 7 \times \frac{0.23}{0.24} = 6.7\text{t/m} \end{aligned} \right\} (6.9)$$

$$\left. \begin{aligned} (P_F)_{\Delta h=0.5} &= 10 \times \frac{0.41}{0.39} = 10.5\text{t/m} \\ (P_B)_{\Delta h=0.5} &= 7 \times \frac{0.24}{0.24} = 7\text{t/m} \end{aligned} \right\} (6.10)$$

で表わされる。

一方、このケースにおいては潮位変動による浮体の浮力の変化は殆んど無視し得るので\*、繫留索の所要初期張力  $P_0$  は、 $\Delta h=0.5\text{m}$  のときの堤外側の張力振幅に等しく

$$P_0 \geq 10.5\text{t/m} \quad (6.11)$$

これに波による張力振幅を加え、堤外側および堤内側繫留索には

$$\left. \begin{aligned} (P_F)_{\max} &\geq 21.0\text{t/m} \\ (P_B)_{\max} &\geq 17.5\text{t/m} \end{aligned} \right\} (6.12)$$

の最大浮力が作用することになる。これは、上述の円形浮体の  $\frac{2}{3}$  程度の値である。

改良浮体の最大張力が円形浮体に比べかなり小さい理由は、円形浮体に比し潮位の変動による浮体の浮力の変化が小さいことが主な原因である。

## (2) 繫留装置

上に求めた円形および改良浮体の最大張力を用いて、

\* 潮位  $\Delta h$  が  $-0.5\text{m}$  から  $0\text{m}$  に変化することにより、浮力は  $0.14\text{t/m}$  増大するにすぎない。 $\Delta h$  がこれ以上になっても浮力の変化はない。

これらを繫留するにはどの程度の碇置装置が必要かを推定してみる。

### a) シンカーによる繫留

まず、堤外および堤内側を別個のシンカーで繫留するとし、その所要寸法を略算してみる。たとえば鋼製シンカーを考え水中における鋼鉄の単位体積重量を  $6.85\text{t/m}$  砂と鋼鉄の摩擦係数  $\mu$  を  $0.3$  と仮定すると、(6.8) 式で与えられる円形浮体の最大張力に対し、シンカーが移動しないための必要重量は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} W_F &= \frac{(P_F)_{\max} \times \cos 45^\circ}{\mu} = 71.7\text{t/m} \\ W_B &= \frac{(P_B)_{\max} \times \cos 45^\circ}{\mu} = 57.3\text{t/m} \end{aligned} \right\} (6.13)$$

ただし、シンカーに作用する波の水平・揚圧力等は無視してある。シンカーの幅を  $10\text{m}$  とし、所要高さを計算すると、堤外側で  $1.05\text{m}$ 、堤内側で  $0.84\text{m}$  となる。一方改良浮体に対しては、これらはそれぞれ  $0.65\text{m}$  および  $0.60\text{m}$  となる。

以上は堤外および堤内側の繫留索を別個のシンカーで繫留する場合であって、その所要重量はシンカーが水平移動しないという条件から定まった。しかしここで、シンカーに作用する水平方向の力を考えてみると、共に堤中央すなわち互いに打ち消す方向に作用することが分る。このことから、堤外および堤内側繫留索を一体となった一つのシンカーで繫留するとすれば、その所要重量をかなり減らし得ることが予想される。そこで、幅  $20\text{m}$  の一つのシンカーで両索を繫留するものとし、円形浮体に対してのみその所要重量を算定してみる。

いま、単位幅当りのシンカーの所要重量を  $W$ 、浮体に作用する水平揚圧力を  $P_H$ 、 $P_U$  とすると、シンカーが移動しないための条件は次のように表わされる。

$$\mu(W - P_U) \geq P_H \quad (6.14)$$

すなわち、重量  $W$  は

$$W \geq \frac{P_H}{\mu} + P_U \quad (6.15)$$

が満たされればよい。ここで、円形浮体に作用する水平および揚圧力は、近似式 (3.2)、(3.3) および (3.10)、(3.11) 式から、

$$\left. \begin{aligned} P_H &= |P_H| \cos(\sigma t + \delta) \\ P_U &= |P_U| \cos \sigma t \\ \delta &= \tan^{-1} y_B \end{aligned} \right\} (6.16)$$

で与えられる。

上式から分るように、水平力と揚圧力の間には位相差があるため、重量 $W$ を得るには  $0 \leq t < T$  の範囲で  $t$  を変化させ、波の1周期間の最大値をとらなければならない。計算によればこの場合、 $W$ の最大値は潮位変動  $dh = 0.5\text{m}$  のときに生じ、約  $40t/\text{m}$  となった。 $dh = -0.5\text{m}$  に対しても、これと同程度の重量が必要であると仮定し、この間の浮力減少を考慮すると  $W = 50t/\text{m}$  となる。これに必要なシンカーの幅を  $20\text{m}$  とすると、高さ約  $0.37\text{m}$  と個別繫留に比しかなり小さい断面でよいことになる。

### b) 杭による繫留

堤外および堤内側繫留索を海底に打ち込んだ杭で繫留する場合について考える。ただし、杭は水平方向の力に対しては一般に十分な強度を有するため、ここでは鉛直方向の力すなわち杭の引き抜き力のみを考慮する。

粘性土中に直径  $1\text{m}$ 、根入れ長さ  $30\text{m}$  の鋼管杭を打ち、粘土層中の粘着力で引き抜きに抗するものとする。杭の許容引き抜き力  $Q_a$  は静力学的公式から、

$$Q_a = \frac{1}{3} \psi L_p c \quad (6.17)$$

で表わされる。

ここで

$\psi$ : 杭の周長 (m)

$L_p$ : 杭の埋め込み長さ (m)

$c$ : 地盤の粘着力 ( $t/\text{m}^2$ )

$c = 3.5t/\text{m}^2$  と仮定し、許容引き抜き力を求めると約  $110t$  となる。(6.8) 式で与えられる円形浮体の浮体長  $1\text{m}$  当りの最大張力から、杭1本が受け持つ浮体長さを計算すると、堤外側で約  $5\text{m}$ 、堤内側で約  $6.4\text{m}$  となる。(6.12) 式で与えられる改良浮体に対しては、これはそれぞれ  $7.4\text{m}$  および  $8.9\text{m}$  に増大する。すなわち、計算上はこれら間隔毎に杭を打ち浮体と繫留すればよい。

以上はモデル化した繫留装置を考えたもので、あまり実際のでない。なお、参考までに実際に現地で使用されているアンカーを紹介すると、たとえば沖繩海洋博で建設されているアクアポリスを繫留するためのパーマメントアンカーは水平力  $250t$ 、鉛直力  $110t$ 、合成力  $273t$  の外力に耐える構造となっている<sup>9)</sup>。

## 7. あとがき

以上、我々は浮防波堤の一案としての円形断面緊張繫留浮体の防波効果および繫留力について、実験的・理論

的に検討を行ない諸特性を把握した。浮防波堤は波高がさ程大きくなく、かつ比較的短周期性の波の防波を目的として建設するのが適当で、強大な波を直接受ける場所には適さないといえる。この意味において改良型も含めた円形断面緊張繫留浮体の効果については、次のようなことが結論づけられよう。

① 水深  $10\text{m}$  地点に外径  $10\text{m}$  の円形浮体をその中心が静水面に一致するよう緊張繫留するとして、入射波周期  $7$  秒程度の波により繫留索に生じる張力変動の振幅は浮体長  $1\text{m}$ 、波高  $1\text{m}$  当り堤外側で約  $3.7t$ 、堤内側で約  $1.3t$  となる。

② この場合、波高伝達率は約  $50\%$  であって、これより短い入射波周期に対しては更に防波効果がよい。

③ 円形浮体の上部および下部を適当に切除した改良型浮体は特に繫留索の波による張力を減するのに効果的である。

さて、この種の浮防波堤を実際の海岸に実現させるにあたっては、今後、種々の検討を要するであろう。たとえば断面的には、

① 防波効果を高める一方、繫留索の張力を小さくするよう浮体断面ないしは繫留装置を改良することが挙げられよう。構造的には

② 浮体をいかなる材料で製作し、かつ施工するか。

③ 万一破損した場合の安全性はどうなるか

平面的には

④ 斜め入射波による浮体の防波効果および繫留力の影響

等について検討する必要がある。

最後に、本論文の作成にあたっては、前水工部長・伊藤喜行博士に負うところが大きい。また、実験の実施・とりまとめに際し、谷本防波堤研究室長から有益な助言を得た。特に、改良型断面は谷本室長との議論の結果生まれたものである。ここに記して感謝する。

(1975年3月31日受付)

## 参考文献

- 1) 伊藤喜行: 浮防波堤の水理, 昭和47年度港湾技術研究所講演概要, 1972, pp. 1-1~22.
- 2) 谷本勝利ほか: 杭式シーパースにおける波力問題, 昭和48年度港湾技術研究所講演会講演集, 1973, pp. 28
- 3) A.T. Ippen: Estuary and Coastline Hydrodynamics. pp. 386
- 4) 田才福造: 浮遊構造物に働く流体力とその運動について, 九州大学, 応用力学研究所, 論議ノート1971.8
- 5) 伊藤喜行・千葉繁: 浮防波堤の水理に関する近似理



- 論と応用, 港湾技術研究所報告, 第11巻, 第2号, 2972, pp. 137~166.
- 6) 1) に同じ, pp. 1~18
- 7) 永井康平: 不規則な海の波の屈折および回折の計算一線型重ね合せ法による平行直線状等深線海岸での屈折と回折の計算図一, 港湾技術研究所報告, 第11巻, 第2号, 1972, pp. 54
- 8) 小山要之助ほか: 沖繩国際海洋博覧会の計画概要, 土木学会誌, 1974年9月号, pp. 68

記号一覧表

$A$	: 張力計断面積
$a$	: 入射波振幅 (半波高)
$B$	: 浮体長さ
$c$	: 地盤の粘着力
$D$	: 円形浮体の外径
$d$	: 繫留時の浮体吃水
$d_0$	: 非繫留時の浮体吃水
$e$	: 張力計水平部材中心から作用張力点までの距離
	: 造波機偏心
$f$	: 入射波の周波数 ( $=1/T$ )
$G$	: 浮体重心
$g$	: 重力加速度
$\overline{GM}$	: メタセンター高さ
$H, H_i$	: 入射波高
$H_{1/3}$	: 有義波高
$H_i$	: 伝達波高
$\bar{H}$	: 平均波高
$h$	: 水深
$\Delta h$	: 潮位変化
$I$	: 浮体の慣性モーメント
$K_T$	: 波高伝達率 ( $=H_i/H_i$ )
$k$	: 波数 ( $=2\pi/L$ )
$L$	: 入射波の波長

$L_p$	: 杭の埋め込み長さ
$l$	: 矩形浮体の半幅
$l_1$	: 浮体重心から繫留点までの水平距離
$M_0$	: 矩形浮体の質量
$P$	: 張力
$P_B$	: 堤内側繫留索に生じる張力変動の振幅
$P_F$	: 堤外
$P_H$	: 浮体に作用する水平力 (3.2) 式
$P_U$	: " 揚圧力 (3.2) 式
$P_0$	: 繫留索の初期張力
$Q_0$	: 許容引き抜き力
$R_H$	: 浮体拘束力 (水平)
$R_V$	: " (鉛直)
$R_M$	: " (回転)
$S$	: 張力計の断面係数
$S_i$	: 入射波の周波数スペクトル
$S_i$	: 伝達波の "
$s$	: 繫留索の長さ
$T$	: 入射波周期
$\bar{T}_{1/3}$	: 有義波周期
$\bar{T}$	: 入射波平均周期
$W$	: 張力計断面係数
$W_0$	: シンカー重量
$z_0$	: 静水面から測った浮体重心までの鉛直距離 (上向き正)
$\alpha$	: 繫留索と海底面のなす角度
$\delta$	: 位相差
$\varepsilon$	: 張力計のひずみ
$\zeta$	: 浮体の鉛直変位
$\theta$	: " 回転変位
$\xi$	: " 水平変位
$\mu$	: 鋼と砂の摩擦係数
$\rho$	: 水の質量
$\sigma$	: $2\pi/T$
$\psi$	: 杭の周長