

# 港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 685      Sept. 1990

長大ケーソンの波力平滑効果と耐波安定性

高橋重雄

下迫健一郎

運輸省港湾技術研究所



## 目 次

要 旨 .....	3
1. ま え が き .....	3
2. 波力低減効果 .....	4
2.1 正弦波形に基づく波力平滑化 .....	4
2.2 合田式に基づく波力平滑化 .....	4
3. 回転に対する安定性 .....	5
3.1 回転による限界重量 .....	5
3.2 回転を考慮した波力低減効果 .....	6
3.3 合田式に基づく回転安定性 .....	7
4. 波 力 実 験 .....	8
4.1 実験方法 .....	8
4.2 直立堤における波力平滑効果 .....	12
4.3 混成堤における波力平滑効果 .....	13
5. 滑 動 実 験 .....	17
5.1 実験方法 .....	17
5.2 波力の平滑化と滑動安定性 .....	17
5.3 滑動安定性に対する回転の影響 .....	19
6. 耐波安定性に関する設計法 .....	19
7. あ と が き .....	19
参 考 文 献 .....	20
主要記号一覧表 .....	20

## Reduction of Wave Force on a Long Caisson of Vertical Breakwater and its Stability

Shigeo TAKAHASHI\*  
Ken'ichirou SHIMOSAKO\*\*

### Synopsis

A caisson breakwater is one of the typical breakwaters in Japan. Each caisson is 10~20m long in ordinary design, but longer caissons can be constructed from a technical view point. In this study, wave force on a long caisson of composite breakwater is investigated theoretically and experimentally.

The wave force is reduced due to the phase difference in oblique waves. The reduction ratio of wave force depends on the caisson length  $l$ , the wave direction  $\theta$ , the wave length  $L$ , and the duration time of peak wave force. The reduction coefficients can be obtained based on the wave forces of Goda's formula. For example, the average wave force reduces to 83%, where the water depth is 14m, the wave period is 15.5s, the wave height is 11m, the incident wave angle is  $30^\circ$ , and the caisson length is 87m.

Rotational force in the horizontal plane becomes significant in oblique waves with a large incident angle. Stability of the caisson against rotation can be judged from the equations of forces and rotational moments. Rotational safety factor is defined by the ratio of resisting force of the caisson to the wave force acting on the caisson.

The rotational stability should be considered as well as the sliding stability for long caissons. However, for the caissons with  $l_b \sin \theta / L < 0.5$ , the rotational stability can be neglected.

Key Word: Long Caisson, Breakwater, Wave Force, Sliding, Rotation

---

\* Chief of Maritime Structures Laboratory, Hydraulic Engineering Division  
\*\* Member of Maritime Structures Laboratory, Hydraulic Engineering Division

# 長大ケーソンの波力平滑効果と耐波安定性

高橋 重雄\*

下迫 健一郎\*\*

## 要 旨

従来の混成防波堤に用いられるケーソン1面の法線方向の長さは、10~20mと比較的短い。この長さは施工性やケーソン部材の強度等から制約されていたが、現在では、技術的にはかなり長いケーソンでも製作できるようになっている。

長大ケーソンは、通常のケーソンに比べて、工期が短縮できることのほかに、作用する波力の法線方向の位相差により、波力を低減する効果がある。これを、波力の平滑化と呼ぶ。波向き方向に対するケーソンの投影長さ  $l_B \sin \theta$  と波長  $L$  の比が大きいくほど、波力の平滑効果も大きくなる。平滑効果は作用する波の状態によっても異なり、砕波のようにピークの部分の作用時間が短く、鋭く切り立った波形の波ほど平滑効果が大きい。波力平滑効果を考慮した水平波力は、合田式における  $\alpha_1$  の項と  $\alpha_2$  の項に対して、それぞれ平滑化係数  $\delta_{B1}$ 、 $\delta_{B2}$  を乗じることにより計算できる。

ケーソンの平面的な回転に対する安定性は、作用する波力とケーソンの自重による摩擦抵抗力に関する、力およびモーメントのつり合い式から計算できる。回転安全率は、ケーソンが動き出すと考えられる限界の集中荷重の値と、実際に作用している波力の比で定義される。

長大ケーソンの耐波設計では、まず通常の合田式による波力を計算し、これに平滑化係数を乗じて滑動に対する設計波力を求めて、ケーソンの所要重量を計算する。さらに、回転に対する安定性についても検討する。ただし、ケーソンの相対長さ  $l_B \sin \theta / L$  が0.5以下であれば、回転に対する検討は省略してよい。

キーワード：長大ケーソン、防波堤、波力、滑動、回転

## 1. ま え が き

我が国における代表的な防波堤は、捨石マウンドの上にケーソンを設置する混成防波堤である。従来の混成防波堤に用いられるケーソン1面の法線方向の長さは10~20mと比較的短い。この長さは一般に施工性やケーソン部材の強度等から制約されていた。しかしながら、これらの問題は近年次第に解決されつつあり、かなり長いケーソンでも製作できるようになっている。

こうした長大ケーソンの例として、古くはアロマンジュ港における、フェニックスと呼ばれるコンクリートケーソンや船舶による防波堤がある。アロマンジュ港は、第二次世界大戦時、ノルマンディ上陸作戦後の補給基地として建設されたもので、フェニックスケーソンは底幅13~16m、全高7.6~18m、長さ53~62mの大きさであ

った<sup>1)</sup>。また、我が国でも戦後まもなく廃船を用いた船体ケーソンによる防波堤が、八戸港、小名浜港などで建設されている<sup>2)</sup>。ただし、これらはきわめて特殊な例であり、その後建設された例は少なく、設計法も確立されていない。

長大ケーソンは、通常のケーソンに比べて、工期が短縮できることのほかに、作用する波力を低減する効果がある。すなわち、斜め入射波の場合、作用する波力の法線方向の位相差の影響が大きくなり、ケーソン全体としては単位長さあたりの平均波力が小さくなるため、通常のケーソンに比べて経済的な断面にできる可能性がある。

従来の設計では、斜め入射波の場合の波力低減をすでに考慮している。すなわち、合田式等において入射角を  $\beta$  として、波圧や作用高さに  $(1 + \cos \beta) / 2$  を乗ずる補正が行われている。ただし、これは波向きによる波力

\* 水工部耐波研究室長

\*\* 水工部耐波研究室

の低減を表したものであり、長大ケーソンの影響を考慮したものではない。

長大ケーソンでは、作用する波力が法線方向に位相差がある場合、全波力の作用位置がケーソン延長の中心からずれるため、ケーソンに比較的大きい平面的な回転力が生じる。通常のケーソンではこの回転力は小さく、ケーソンの安定性に対しては無視できるが、長大ケーソンでは、これによりケーソンが実際に回転する危険性がある。

本研究は、長大ケーソンに関して、法線方向の位相差の影響による波力の低減効果や、ケーソンの滑動および平面的な回転に対する安定性を、理論的、実験的に検討し、その安定性の設計法を提案するものである。

## 2. 波力低減効果

### 2.1 正弦波形に基づく波力の平滑化

長大型ケーソンにおける波力の低減効果は、ケーソンの法線方向の各点において、波力がピークとなる時間に位相差があることによって生じる。たとえば図-1において、B点で波力がピークとなったとき、A点やC点の波力はピーク値よりも小さい。したがって、ピーク値がケーソン全体に作用すると考えた場合の波力合力に比べ、実際にケーソン全体に作用する波力合力は必ず小さくなる。この波力の低減効果は空間的な平均をとることによるものであり、以後これを波力の平滑化とよぶことにする。

ケーソンの長さを  $l_B$ 、波の入射角を  $\theta$ 、波長を  $L$  で表すと、波向き方向に対するケーソンの投影長さ  $l_B \sin \theta$  と波長の比  $l_B \sin \theta / L$  が大きいほど、波力の平滑効果が大きくなる。波圧の時間変化が正弦波的な場合には、波力の平滑

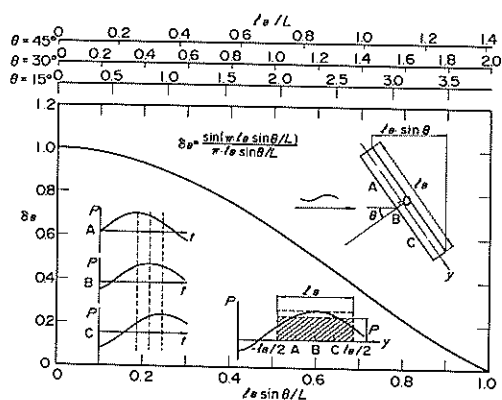


図-1 長大ケーソンに作用する波力とその平滑化

化係数  $\delta_B$  はケーソンの相対長さ  $l_B \sin \theta / L$  によって次式で表される<sup>3)</sup>。

$$\delta_B = \frac{\sin(\pi \frac{l_B \sin \theta}{L})}{\pi \frac{l_B \sin \theta}{L}} \quad (l_B \sin \theta / L \leq 1) \quad (1)$$

図-1の曲線は、横軸にケーソンの相対長さをとって、 $\delta_B$  の変化を示したものである。図の上側には  $\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$  の場合のケーソン長と波長の比  $l_B / L$  も示している。たとえば平均波力を2割減少させるためには、 $\theta = 30^\circ$  の場合、波長の0.7倍程度のケーソン長が必要であり、 $15^\circ, 45^\circ$  でそれぞれ1.4倍、0.5倍程度のケーソン長が必要であることがわかる。現地において、水深20m、周期10sとすれば、波長は約120mであるから、 $30^\circ$  の場合で84m、 $15^\circ, 45^\circ$  ではそれぞれ168m、60m程度のケーソン長となる。

### 2.2 合田式に基づく波力の平滑化

混成堤のケーソンに作用する波力の波形は、実際には波の有限振幅性により、いわゆる双峯型となる。さらにマウンドが高い場合や波高が大きい場合には、波力波形においてピークが切り立った、作用時間の短い衝撃的な波力が作用する。通常的设计で用いる合田式では、静水面における波圧を次式で表し、衝撃的な成分を考慮している<sup>4)</sup>。

$$p_1 = 0.5 (1 + \cos \beta) (\alpha_1 + \alpha_2 \cos^2 \beta) w_0 H \quad (2)$$

上式の  $\alpha_1$  は重複波圧的な成分を表すと考えられる。また、 $\alpha_2$  はマウンドの高さや、波高の大きさなどによって決まり、衝撃的な波が作用するときほど大きな値となる。なお、 $\beta$  は危険側へ  $15^\circ$  補正した波向きであり、ここでは式(1)で用いている  $\theta$  と同義である。

合田式では波圧の時間的変化は定義されていないが、合田式の波力に基づいた、より現実に近い波形として、図-2に示すように  $\alpha_1$  の項のみを正弦波とし、 $\alpha_2$  の項

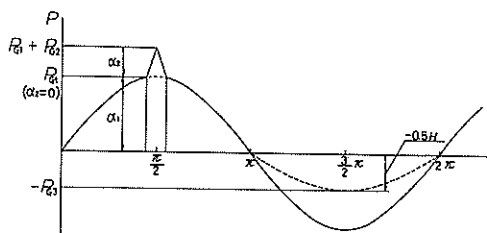


図-2 合田式を適用した波力の時間変化

は作用時間が周期 $T$ の $1/20$ の三角波として付け加えた波形を考える。衝撃的な成分の作用時間については、既往の実験における波圧波形を参考に決定した。このような波形を考えると、波力の平滑化係数は、ケーソンの相対長さだけでなく、 $\alpha_2$ と $\alpha_1$ の比によっても異なる。 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ の項の平滑化係数をそれぞれ $\delta_{B1}$ 、 $\delta_{B2}$ とすると、全体の平滑化係数 $\delta_B$ は次式で表される。

$$\delta_B = (\delta_{B1} + \gamma \delta_{B2}) / (1 + \gamma) \quad (3)$$

ここに、

$$\delta_{B1} = \frac{\sin(\pi l_B \sin \theta / L)}{\pi l_B \sin \theta / L} \quad (4)$$

$$\delta_{B2} = \begin{cases} L / (40 l_B \sin \theta) : l_B \sin \theta / L \geq 1/20 \\ 1 - 10 l_B \sin \theta / L : l_B \sin \theta / L < 1/20 \end{cases} \quad (5)$$

$$\gamma = \alpha_2 \cos^2 \theta / \alpha_1 \quad (6)$$

図-3は、この計算法による $\delta_B$ の値を示している。ただし、 $\gamma = 0$ のときは正弦波形による結果と同じとなる。 $\alpha_2$ が大きい衝撃的な波が作用するときほど、ケーソン長が比較的短くても波力の低減効果が大きいことがわかる。たとえば $l_B \sin \theta / L$ が $0.1$ の場合、 $\gamma = 0.2$ で $\delta_B = 0.864$ となり、 $\gamma = 0$ のときよりかなり小さくなる。

なお、実際には図-2に破線で示したように、正の波力と負の波力ではピーク値が異なり、負の波力についてはケーソン前面の水位が $-0.5H$ だけ低下したときの波力を考えるのが適切である。すなわち、波力波形は次式で表される。

$$P = \begin{cases} P_{C1} \sin 2\pi \xi & (0 \leq \xi < 9/40, 11/40 \leq \xi < 1/2) \\ P_{C1} \sin 2\pi \xi + P_{C2} (1 - |1/4 - \xi|) & (9/40 \leq \xi < 11/40) \\ |P_{C3}| \sin 2\pi \xi & (1/2 \leq \xi < 1) \end{cases} \quad (7)$$

ここに、

$$\xi = t/T - y \sin \theta / L \quad (8)$$

であり、 $P_C$ の添字の1と2はそれぞれ $\alpha_1$ と $\alpha_2$ の項による合田式の波力を、3は負の波力を示す。なお負の波力の影響が現われるのは $l_B \sin \theta / L > 0.5$ のときであるが、図-3ではこれを考慮していない。

実際の設計では、まず通常の合田式による波力を計算し、次に $\delta_B$ の値を求めて合田式の波力に乗ずることにより、単位長さ当りの設計波力とする。厳密には各点ごとに波力の作用高さも異なることの影響も考慮すべき

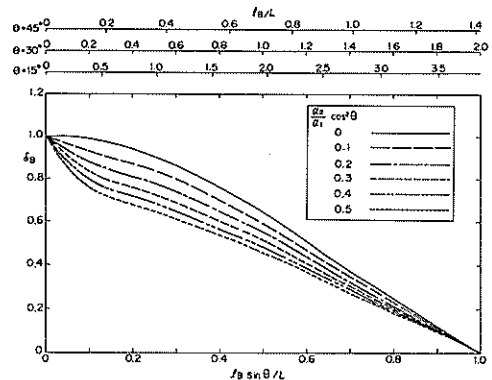


図-3 合田式による波力平滑効果

であるが、計算が複雑になり、しかも考慮しないほうが安全側となるため、設計では無視できる。なお、揚圧力については合田式において $\alpha_2$ の項を含まないので、後述するように平滑化係数として $\delta_{B0}$  ( $= \delta_{B1}$ )を用いるものとする。

### 3. 回転に対する安定性

#### 3.1 回転に対する限界重量

一般にケーソンに働く波力には、法線方向に位相差があるため、平面的な回転力が生じる。この回転力は通常のケーソンでも生じるが、長大ケーソンの場合、これによってケーソンが実際に回転する危険性がある。したがって、回転に対する安定性の検討を行う必要がある。

図-4は、ケーソンに集中荷重が作用した場合の反力、

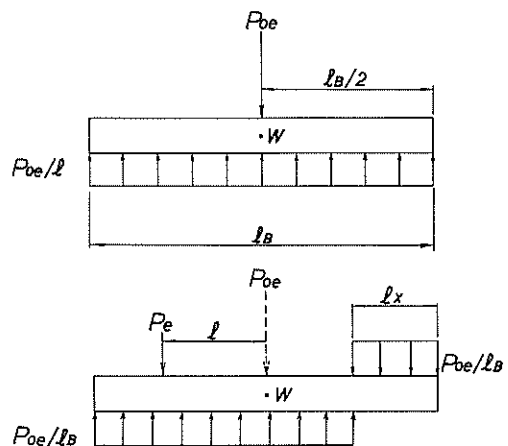


図-4 回転に対する抵抗力と限界荷重

すなわち摩擦による抵抗力の分布を示したもので、上図はケーソンの中心に滑動限界荷重 $P_{0e}$ が作用した場合である。 $P_{0e}$ とケーソン重量 $W$ の間には次の関係が成り立つ。

$$P_{0e} = \mu W \quad (9)$$

ここに $\mu$ は摩擦係数を表す。一方、下図は中心から $l$ だけ離れた位置に、回転に対する限界荷重 $P_e$ が作用したときの分布で、ケーソンの一部に長さ $l_x$ だけ逆向きの抵抗力が作用するものと仮定している。この仮定に基づくと、 $P_e$ と $l_x$ について、次式で与えられるような力とモーメントのつり合いに関する連立方程式が与えられる。

$$P_e = P_{0e} / l_B (l_B - 2l_x) \quad (10)$$

$$P_e (l_B / 2 - l_x + l) = P_{0e} / l_B (l_B - l_x)^2 / 2 + P_{0e} / l_B l_x^2 / 2 \quad (11)$$

これらを解くと、次式の結果が得られる。

$$P_e / P_{0e} = \sqrt{4(l/l_B)^2 + 1} - 2(l/l_B) \quad (12)$$

$$l_x / l_B = (l/l_B) + (1 - \sqrt{4(l/l_B)^2 + 1}) / 2 \quad (13)$$

図-5の曲線は、これらの計算値を示したものであり、荷重が偏心することによって、小さな荷重で回転してしまうことがわかる。たとえば、荷重の作用位置が堤端の場合( $l/l_B = 0.5$ )には、 $P_e / P_{0e} = 0.414$ となり、中心の場合の半分以下の荷重で回転が生じてしまう。図中には実際にケーソンに集中荷重を作用させて、移動限界を調べた載荷実験結果も合わせて示してあるが、実験値と計算値はほぼ一致しており、反力分布の仮定は妥当と考えられる。なお、実験値で $l/l_B > 0.5$ のケースは、

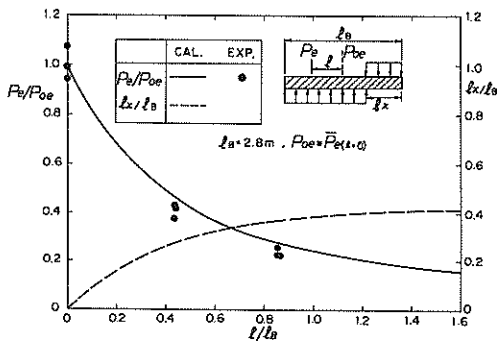


図-5 集中荷重による回転限界

ケーソンに鋼製のアングルを固定して一体化し、アングルに荷重を作用させることにより、堤端よりも外側に荷重を作用させたものである。実際にケーソンに作用する波力は分布荷重であるが、合力と作用位置を計算することにより集中荷重に置き換えて考えることができる。

### 3.2 回転を考慮した波力低減効果

ケーソンの相対長さが大きい場合には、作用する波力に対して通常の滑動が生じないように堤体重量を設定しても、回転によってケーソンの変位が生じる可能性がある。ケーソンに作用する水平波力の合力の大きさを $F_H$ 、中心からの作用位置のずれを $l$ とし、作用位置のずれが $l$ のときに回転が生じる限界荷重 $F_{Hc}$ と、実際に作用する水平波力 $F_H$ の比を、ケーソンの回転に対する安全率 $SFR$ と定義する。この安全率が1.0以下になると、回転が生じることになる。なお、前節においては、集中荷重を $P$ で表したが、これ以後 $P$ はケーソンの単位長さあたりの水平波力を表し、集中荷重に置き換えた合力は $F$ で表すものとする。

本節では、簡単のため正弦波的時間変化の水平波力について検討しており、合田式に基づいた波形や揚圧力の影響は考えていない。これらの点については次節で述べる。

回転力は波力合力がピークになるときではなく、ややずれた位相で最大となり、その時の回転力に対して安全率を計算しなければならないことに注意する必要がある。図-6は、滑動安全率 $SFs$ と回転安全率 $SFR$ の時系列変化の例を示したものである。 $SFs$ はケーソンの相対長さ $l_B \sin \theta / L$ に関係なく時間とともに大きくなるが、 $SFR$ は時間とともに減少し、 $l_B \sin \theta / L$ が大きいほど、減少の割合が大きい。たとえばこの図の $l_B \sin \theta / L = 0.25$ では、ごくわずかに $SFR$ が1.0を下回るときがあるが、 $l_B \sin \theta / L = 0.5$ では、かなりの長い時間 $SFR$

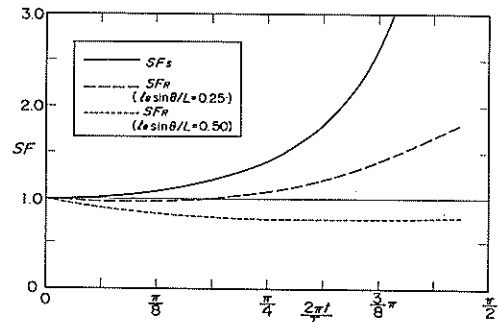


図-6 滑動安全率と回転安全率の時系列変化

が1.0を下回っている。なお  $t/T = 1/4$  のときは  $F_H = 0$  となるため  $SF_R$  は無限大となる。このように、回転に対する安定性を考慮すると、設計に用いる波力合力を平滑化係数によって無制限に低減することができなくなる。

図-7は、通常の平滑化係数(実線)と、回転の安定性も考慮した場合の平滑化係数(破線)を示したものである。両者を比較すると常に回転を考慮した場合のほうが  $\delta_B$  が大きく、安定性が回転により決まり、平滑化係数はあまり小さくならないことがわかる。ただしこれは、通常的设计に基づき滑動安全率、回転安全率ともに1.2として、検討した場合である。しかしながら、後述するように、回転による変位は生じにくく、安全率を下げることも考えられる。そこで、回転安全率を1.0にした場合の結果も点線で示している。この場合は、ケーソンの相対長さが0.45までは通常の滑動で、それより長い場合は回転で決まり、 $\delta_B$  の下限は0.7程度と考えられる。

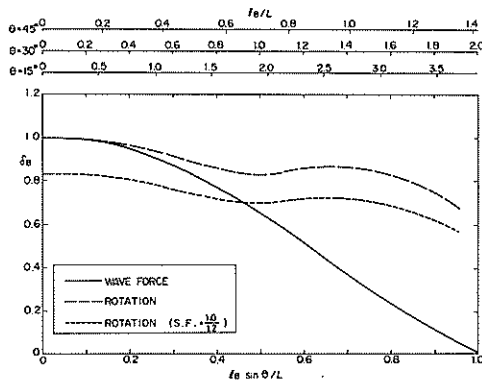


図-7 回転を考慮した波力低減率

### 3.3 合田式に基づく回転安定性

#### (1) 水平波力で定義される回転安全率

前項まではケーソン抵抗力を等分布として考えてきたが、実際の波作用時には揚圧力が作用するため、ケーソン単位長さあたりの見かけの重量が異なり、抵抗力の値も場所ごとに異なる。したがって、前述の式(10)、(11)は、次式のように書き換えられる。

$$F_{He} = \int_{-\frac{l_B}{2}}^{\frac{l_B}{2} - l_x} \mu(w - U(y, t)) dy - \int_{\frac{l_B}{2} - l_x}^{\frac{l_B}{2}} \mu(w - U(y, t)) dy \quad (14)$$

$$F_{He} (l_B / 2 + l - l_x)$$

$$= \int_{-\frac{l_B}{2}}^{\frac{l_B}{2} - l_x} \mu(w - U(y, t)) (\frac{l_B}{2} - y - l_x) dy - \int_{\frac{l_B}{2} - l_x}^{\frac{l_B}{2}} \mu(w - U(y, t)) (\frac{l_B}{2} - y - l_x) dy \quad (15)$$

ここに、 $w'$  は単位長さあたりのケーソンの水中重量である。また、 $y$  は法線方向上の位置を表す。 $U(y, t)$  はケーソンの単位長さあたりに作用する揚圧力で次式で表される。

$$U(y, t) = \begin{cases} U_c \sin 2\pi\xi (0 \leq \xi < \frac{1}{2}) \\ |U_N| \sin 2\pi\xi (\frac{1}{2} \leq \xi < 1) \end{cases} \quad (16)$$

ここに  $U_N$  は引き波時の揚圧力のピーク値である。

式(14)、(15)から  $F_{He}$  を求め、実際に作用する水平波力  $F_H$  との比で回転安全率が計算される。しかしながら、式(14)、(15)は  $U(y, t)$  が  $y$  の関係であるため、数値的に解き  $F_{He}$  と  $l_x$  を同時に求める必要があり、計算が非常に複雑となる。

#### (2) 合成波力で定義される回転安全率

ここでは、回転安全率の計算を簡単にするために、揚圧力の項を左辺に移項し水平波力と揚圧力を合わせた合成波力  $F_c$  を考える。すなわち、静水時のケーソン重量から計算される、回転に対する限界合成波力  $F_{c0}$  と、実際にケーソン全体に作用する水平波力と揚圧力から計算される合成波力  $F_c$  との比で回転安全率  $SF_R$  を定義する。これにより、式(14)、(15)は次式のように書き換えられる。

$$F_{c0} = \mu w' (l_B - 2l_x) \quad (17)$$

$$F_{c0} (l_B / 2 + l - l_x) = \mu w' (l_B - l_x)^2 / 2 + \mu w' l_x^2 / 2 \quad (18)$$

合成波力  $F_c$  は水平波力  $F_H$ 、揚圧力  $F_U$  を用いて、次式で定義される。

$$F_c = F_H + \mu F_U \quad (19)$$

図-8はこの考え方を模式的に示したものである。抵抗力が一部逆向きに作用するため、揚圧力の向きも変わることには注意を要する。この方法による安全率の計算を各時間ステップごとに行い、一周期内で最小となる  $SF_R$  を求める。

式(17)、(18)は、式(10)、(11)において  $P_c$  を  $F_{c0}$  に、 $P_{c0} / l_B$  を  $\mu w'$  に置き換えた式であるから、次式の結果が得られる。

$$F_{c0} / \mu w' = \sqrt{4(l/l_B)^2 + 1} - 2(l/l_B) \quad (20)$$

$$l_x / l_B = (l/l_B) + (1 - \sqrt{4(l/l_B)^2 + 1}) / 2 \quad (21)$$

したがって、 $l$  が求められれば安全率が計算できる。た



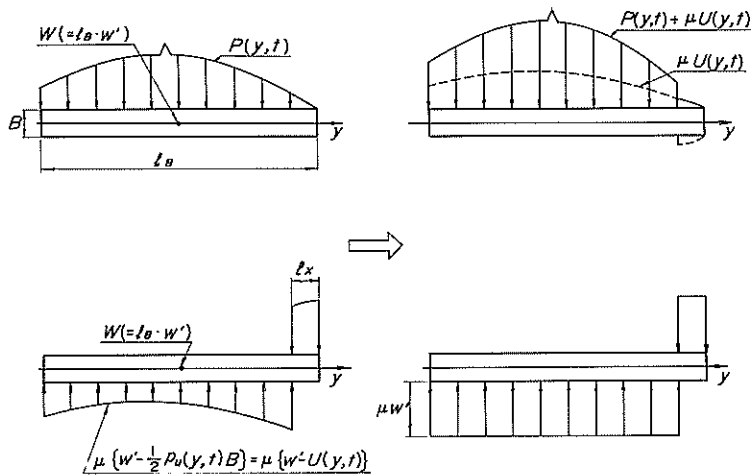


図-8 揚圧力を考慮した回転限界波力

だし、 $l$ を求めるためには $l_x$ の値が必要であるから、繰り返し計算を行わなければならない。実際の計算方法としては、次のような手順となる。

- ① 水平波力から $l_x$ の初期値を求める。この値を用いて、揚圧力も考慮した滑動合成波力を計算し、作用位置のずれ $l$ を求める。
- ② 式(10)によりあらためて $l_x$ を求める。これを $l_x$ が収束するまで繰り返す。実用上は4回程度繰り返せば十分である。
- ③ 式(10)よりケーソンの回転に対する抵抗力、すなわち回転に対する限界滑動合成波力 $F_{s0}$ を求め、実際に作用する滑動合成波力 $F_s$ との比を $SF_R$ とする。

図-9は、その計算例を図-6と同じ条件について示したもので、回転安全率は正弦波形による水平波力のみを考慮した場合に比べ、全体的にやや大きくなっている。

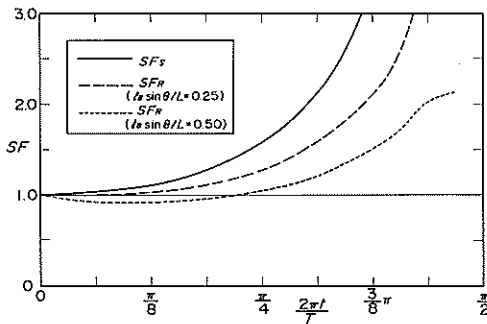


図-9 滑動安全率と回転安全率の時系列変化

一般に、回転安全率は、滑動安全率と比べると波向きが大きくなるほど小さくなる。しかしながら、波向きが大きくなると合田式による波力が小さくなり、また、平滑化係数も小さくなるため、安全性を確保するための所要重量はかなり小さくなる。したがって、回転の検討に用いる波向きは、従来の滑動安定性に対する設計で用いられている、 $15^\circ$ 危険側、すなわち直角入射に近づく方向へ補正した角度についてのみでよく、補正前の角度や、 $15^\circ$ 斜め方向へ補正した波向きについては検討する必要はない。

## 4. 波力実験

### 4.1 実験方法

#### (1) 実験施設と模型

波力低減効果を検証するために、波力実験を行った。実験は、ケーソンを直接設置した直立堤に関するものと、捨石マウンド上に設置した混成堤に関するものの2種類である。直立堤の実験は、図-10に示した長さ25m、幅37mの平面水槽で行った。この水槽には多方向不規則波を造波できるサーベント型造波機が設置されている。混成堤の実験は、図-11に示した長さ50m、幅20mの平面水槽で実施している。この水槽は水深が大きくとれ、また大波高の一方不規則波を作用させることができる。直立堤の模型は、波力測定用のアクリル製ケーソンとコンクリート製ケーソンを並べて形成した。図-12は、波力測定用アクリル製ケーソンの断面図を示したものである。ケーソンの前面および底版に超小型の波圧計を取り付けて波圧の分布を測定すると同時に、分力計を取り

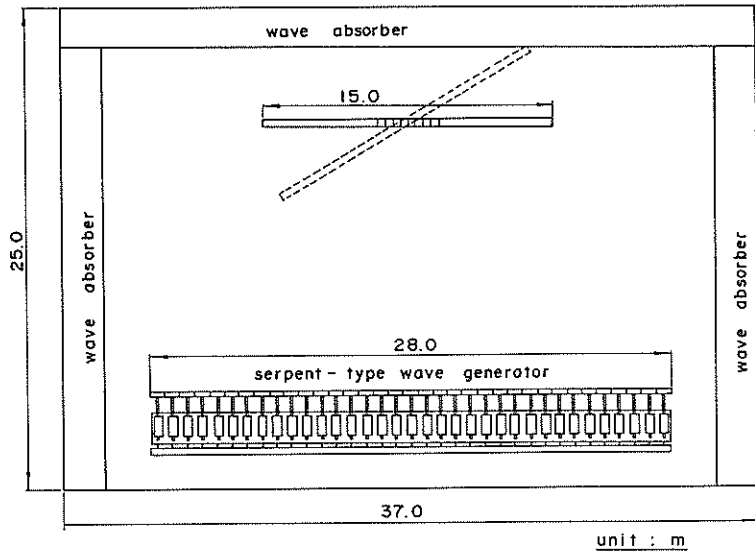


図-10 直立堤実験における水槽平面図

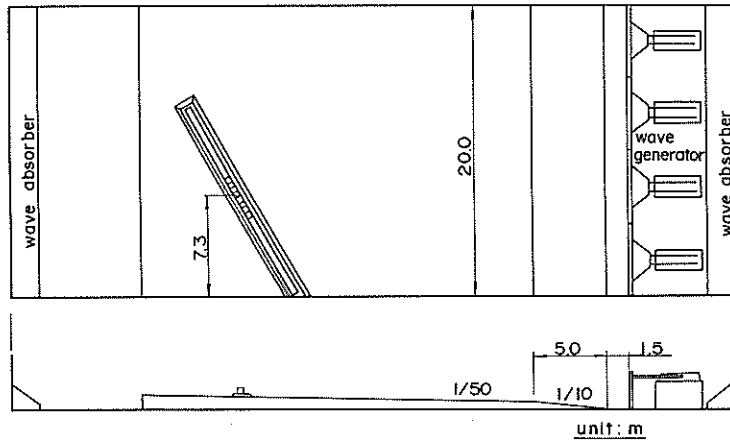


図-11 混成堤実験における水槽平面図

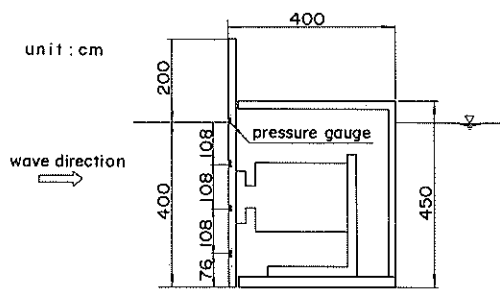


図-12 直立堤実験堤体断面

付け、前面板に作用する全水平波力を測定した。図-13は、混成堤模型の断面を示したもので、捨石マウンド上にケーソンを設置している。水深は堤体中央部で40cmである。破線で示したように、一部のケースについては被覆ブロックをかさ上げして前面水深を浅くし、砕波を

促進させた断面で行っている。図には示していないが、直立堤と同様にケーソンに波圧計と分力計を取り付けている。実験では防波堤模型の中央部にこうした波力測定用ケーソンを6函並べ、ケーソン1函あたりに作用する波力を測定した。また、複数のケーソンの同時刻における波力の平均値を計算することにより、ケーソン長を大きくした場合の平均波力も求めている。

(2) 実験波

実験波は、直立堤の実験では一方向不規則波と多方向不規則波、混成堤の実験では一方向不規則波である。目標とした周波数スペクトルは、いずれも修正ブレットシュナイダー・光易型で、多方向不規則波の方向集中度パラメータ  $S_{max}$  は10とした。表-1に実験波の一覧を示している。

図-14は、周波数スペクトルの例を示したもので、縦軸、横軸ともに無次元化してある。周期によって多少のばらつきはあるが、全体として目標としたスペクトル

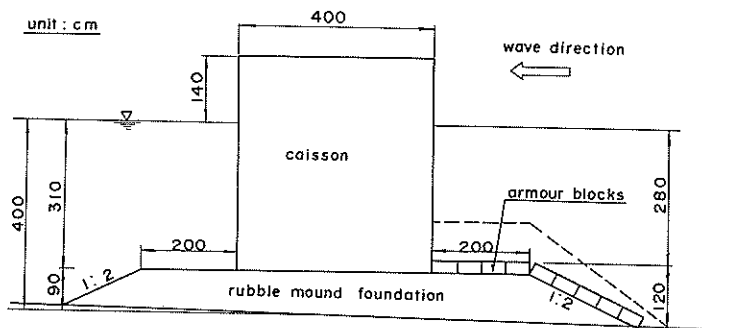


図-13 混成堤実験堤体断面

表-1 実験波一覧

実験の種類	波種	$T_{1/3}$ (s)	$L_{1/3}$ (m)	$H_{1/3}$ (cm)	$H_{max}$ (cm)
直立堤実験	一方向 不規則波	2.36	4.45	4.0 ~ 10.7	5.9 ~ 15.9
		2.09	3.88	3.5 ~ 10.1	5.3 ~ 15.2
		1.60	2.83	2.8 ~ 7.3	4.1 ~ 10.5
	多方向 不規則波	2.35	4.43	3.6 ~ 10.3	6.2 ~ 17.8
		2.02	3.74	3.3 ~ 9.5	5.9 ~ 15
		1.58	2.79	2.7 ~ 6.1	4.4 ~ 3.9
混成堤実験	一方向 不規則波	2.65	5.05	12.9 ~ 23.0	19.6 ~ 30.0
		2.10	3.90	11.8 ~ 21.4	18.9 ~ 39.9
		1.76	3.18	9.2 ~ 19.1	17.4 ~ 26

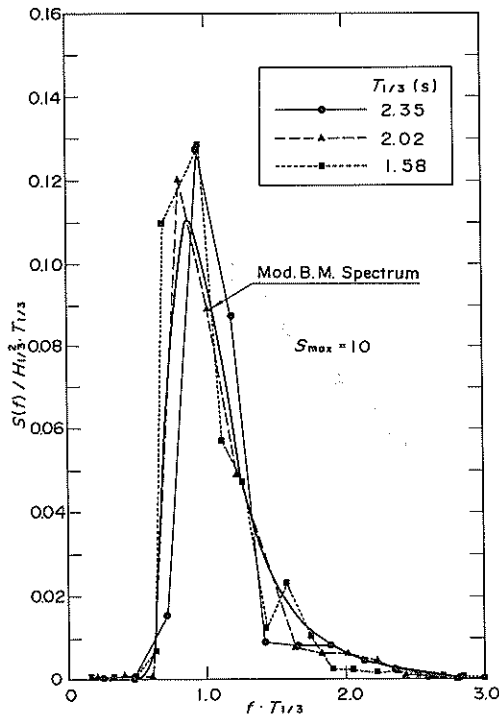


図-14 通過波スペクトルの例

(修正プレットシュナイダー・光易型)によく合っている。

図-15(a), (b)は堤体設置前に行った通過波検定時の、有義波高 $H_{1/3}$ とその他の代表波高の関係を示したものである。直立堤実験は、波高が小さく碎波の生じない範囲で行っている。今回の実験は有効波数250波程度で行っており、レーリー分布に基づく最高波高 $H_{max}$ と有義波高の比の期待値は、最頻値が1.66、平均値が1.75である。実測値はばらついてはいるが、全体として、理論値よりもやや小さい。1/10最大波高 $H_{1/10}$ と有義波高の比は、理論値の1.27にはほぼ合っている。一方、混成堤実験は碎波の生じる範囲まで行っており、図-15(b)の実測値でも、有義波高が大きくなるにつれて $H_{max}$ の値がほぼ一定値に近づく傾向が見られる。 $H_{1/10}/H_{1/3}$ の値については、有義波高が20cmまでは理論値と一致しており、それ以上になると理論値よりもやや小さくなっている。

(3) 分力計と波圧計による波力の比較

今回の実験では、水平波力の検討には分力計による測定値を用いたが、比較のために波圧計による測定も行っている。図-16(a), (b)は、混成堤実験のそれぞれ $\theta = 0^\circ$ と $30^\circ$ の場合について、分力計による測定値 $f_L$ と波圧計による測定値 $f_p$ の相関を示したものである。ただし $f_L$

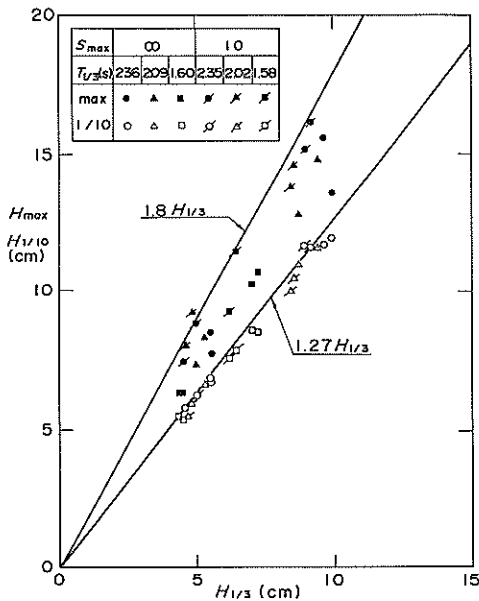


図-15(a) 有義波高とその他の代表波高の関係 (直立堤)

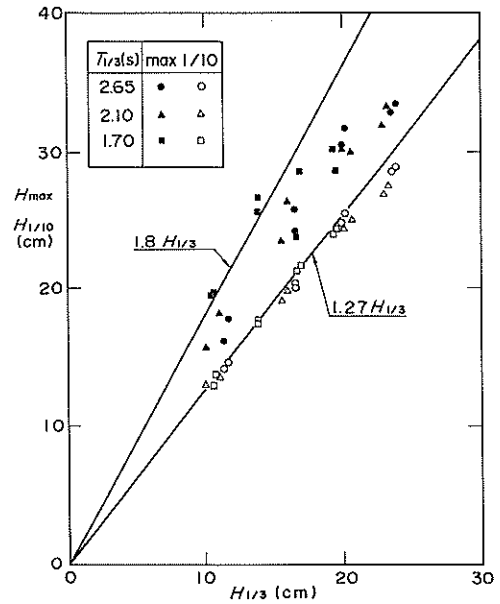


図-15(b) 有義波高とその他の代表波高の関係 (混成堤)

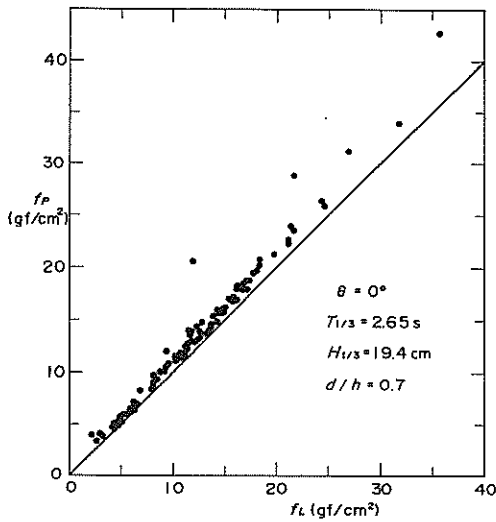


図-16(a) 分力計と波圧計の相関 ( $\theta = 0^\circ$ )

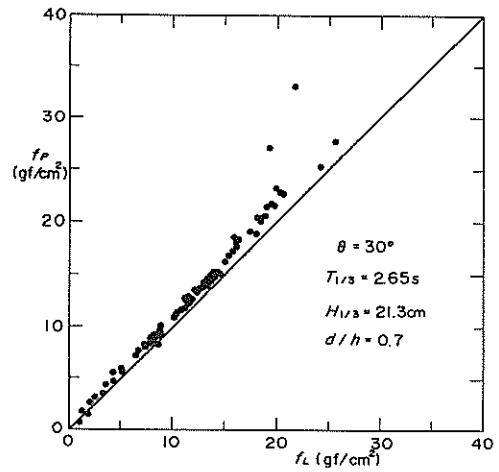


図-16(b) 分力計と波圧計の相関 ( $\theta = 30^\circ$ )

は分力計の測定値を単位面積あたりに換算したものであり、 $f_p$ はケーソン前面に取り付けた4個の波圧計による測定値の平均である。波向きによる違いはほとんどなく、全体的に波圧計のほうがやや大きくなっており、この傾向は波力が大きくなると特に顕著になる。これは、波圧計の受圧面が $1\text{ cm}^2$ と非常に小さいのに対し、分力計の受圧面はケーソンの前面板全体(約 $1600\text{ cm}^2$ )であり、局所的な波力が平均化されるためと考えられる。このような場合、局所的な部材などに作用する波力の測定には波圧計のほうが適当であるが、ケーソン全体の安定性などを検討するときは、波圧計の値を用いると、波力を過大に評価する可能性がある。

#### 4.2 直立堤における波力平滑効果

直立堤の実験は、水深に比べて波高が小さい重複波領域の波を用いて、非越波の条件で行っている。実験波は一方向不規則波と多方向不規則波を用い、波向きを $0^\circ$ から $90^\circ$ まで変化させている。

図-17は、 $\theta = 45^\circ$ の場合について、ケーソン長 $l_B$ の違いによる波力波形の変化を示したもので、上から順に $40\text{ cm}$ (1函)、 $120\text{ cm}$ (3函)、 $240\text{ cm}$ (6函)の平均水平波力強度であり、それぞれ $f_{LC}$ 、 $f_{LS}$ 、 $f_{LE}$ で表している。波高が小さいため、ケーソン1函の場合でも比較的正弦波に近い波形となっている。ケーソン長が大きくなるにつれて、平滑化により波力のピーク値が小さくなっていることがわかる。波力の減少する割合は、正の波力のほうが負の波力よりも大きい。これは、 $f_{LC}$ の

波形からわかるように、正の波力のほうが作用時間が短く、波形の変化が大きいためである。なお、 $f_{LE}$ がピークとなるタイミングが他の2つに比べてややずれているが、これは6函分を1函と見なした場合、ケーソン中央の位置が沖側に $20\text{ cm}$ ずれるためである。

図-18(a)~(d)は、種々の条件における水平波力の平滑化係数 $\delta_B$ の計算値と実験値を比較したものである。 $\delta_B$ の実験値は、不規則波群中の1/10最大値に相当する1波

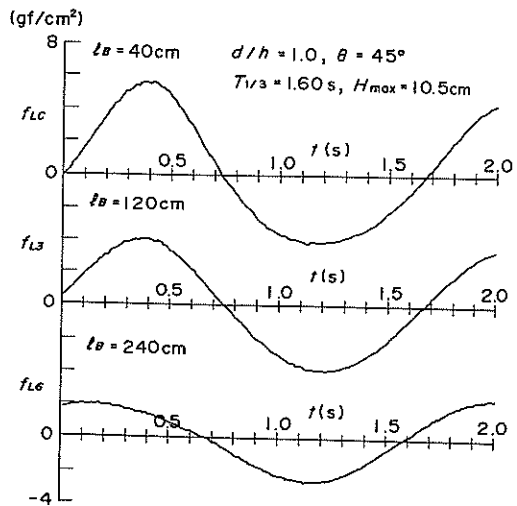


図-17 水平波力波形の変化(直立堤)

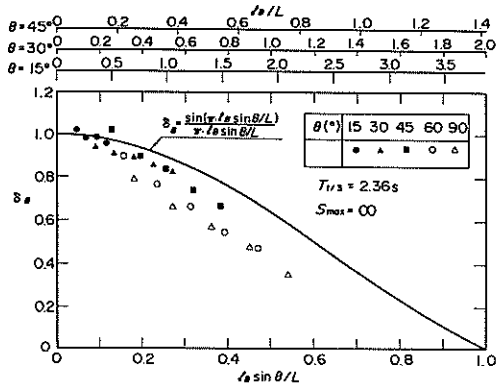


図-18(a) 水平波力の平滑効果  
(直立堤, 一方向,  $T_{1/3} = 2.36s$ )

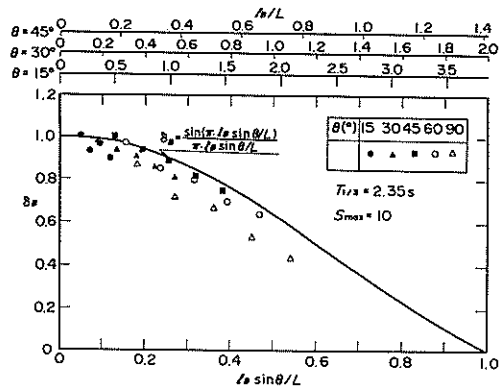


図-18(b) 水平波力の平滑効果  
(直立堤, 一方向,  $T_{1/3} = 2.35s$ )

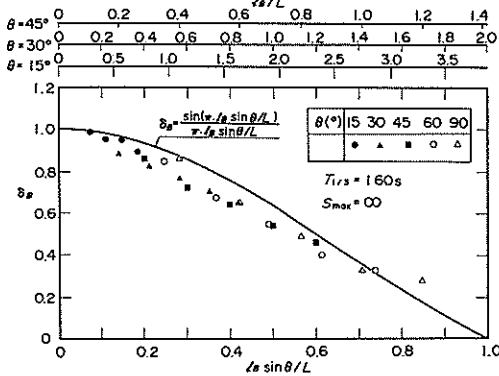


図-18(c) 水平波力の平滑効果  
(直立堤, 一方向,  $T_{1/3} = 1.60s$ )

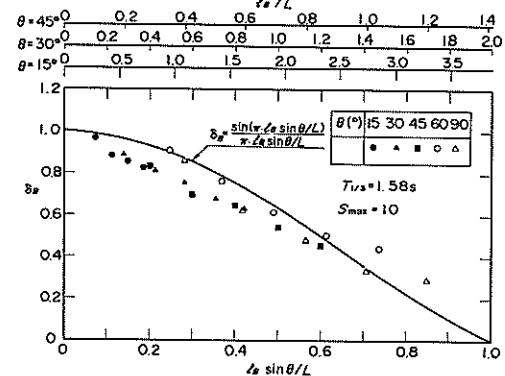


図-18(d) 水平波力の平滑効果  
(直立堤, 一方向,  $T_{1/3} = 1.58s$ )

に着目し、1 函に作用した波力のピーク値に対する、複数函の場合の波力低減率を計算している。ただし、1 函に作用する波力は測定した各函でややばらつきがあるため、それらの平均値を用いている。実験値と計算値を比較すると、全体的に実験値のほうがやや小さめの値になっている。これは波形が完全な正弦波ではなく、有限振幅性の影響があるためと考えられる。周期が長いケースでは、 $60^\circ$ と $90^\circ$ のときに計算値よりもかなり小さくなっているが、これは入射角が大きすぎて防波堤の長さが十分でなく、重複波の形成が不十分であったことなどが原因と思われる。なお、ここに示したのは、波群中の 1 / 10 最大波に相当する波の結果であり、一方向不規則波 ( $S_{max} = \infty$ ) と多方向不規則波の顕著な違いは見られ

ない。これ以外にもいくつかのケースについて調べたが、やはり大きな違いは見られなかった。したがって、多方向不規則波の場合、多少のばらつきはあっても、 $\delta_{\theta}$  に関しては、平均的には一方向不規則波の場合とほとんど変わらないものと考えられる。ただし、一波ごとのばらつきと方向分散性の関係などについては、さらに検討の必要がある。

#### 4.3 混成堤における波力平滑効果

##### (1) 水平波力の平滑効果

現地ではほとんどの場合、ケーソンはマウンド上に設置され、かなり大きな波が作用するため、ピークの切り立った波形を持つ波力が作用することになる。そこで、こうした実際の波力に対する平滑効果を調べるために、

マウンド上に設置したケーソンに作用する波力を、種々の条件のもとで測定した。

図-19(a), (b)は、 $\theta = 30^\circ$ の場合について、ケーソン長 $l_b$ の違いによる水平波力波形の変化の例を示したものである。ケーソン前面水深 $d$ と水深 $h$ の比が0.5と0.7の2種類について、いずれも波群中の $H_{max}$ に相当する波

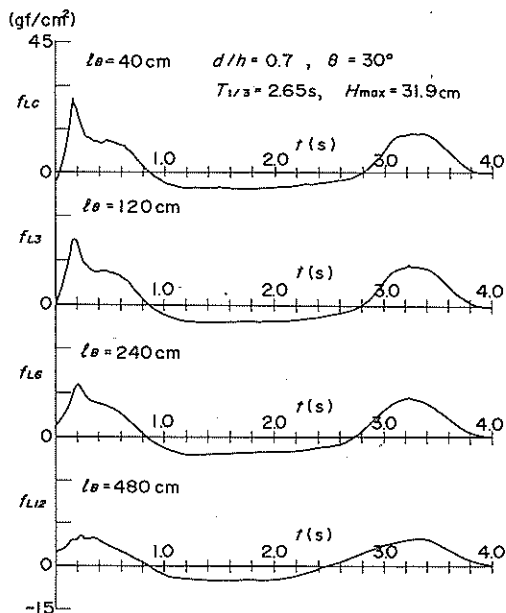


図-19(a) 水平波力波形の変化 (混成堤,  $d/h = 0.7$ )

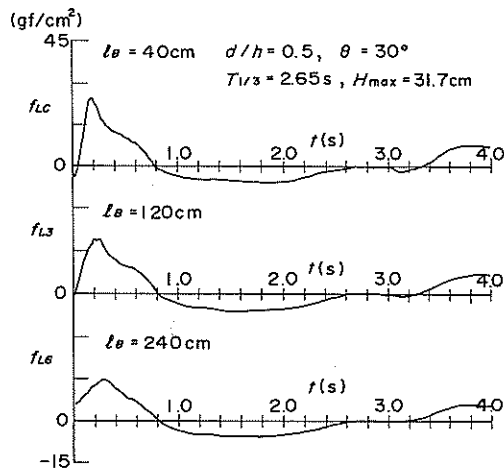


図-19(b) 水平波力波形の変化 (混成堤,  $d/h = 0.5$ )

の波力波形を抜き出している。 $d/h = 0.7$ のケースで $l_b = 480$  cm (12函)の平均波力強度は、波力測定用ケーソンを1函おきに並べて測定したものである。ケーソン長が大きくなるにつれて波形の切り立ったピークの部分がかなり小さくなっており、正弦波形に比べて明らかに平滑効果が大きいことがわかる。なお、本来は $d/h$ の小さい断面のほうがより衝撃的な波力が作用するはずであるが、この例ではピーク値はほとんど同じで、波形を見るとむしろ $d/h = 0.7$ のほうがやや切り立っている。ここでは示していないが、波圧計の場合も、 $d/h$ の違いによる波形の差はほとんどみられない。これは、既往の研究<sup>5)</sup>でも明らかのように、 $\theta = 30^\circ$ の場合、あまり衝撃的な波力は発生しにくいとめと考えられる。

これまでも述べたように、長大ケーソンの波力平滑効果は、波力の空間的平均をとることによって得られるものである。しかしながら、もし波の変形を無視できれば、この効果はある点での波力の時間的移動平均をとることも計算できる。すなわち、波がケーソンの端から端まで伝わる時間を波速から求め、その時間分の移動平均をとれば波力波形を計算できる。図-20はその結果を示したもので、上の波形は分力計による1函の波力波形(実測値) $f_{LC}$ 、下の波形は分力計による6函分の平均波力波形(実測値) $f_{LS}$ 、分力計による6函分の平均波力波形(1函の波力波形の時間平均) $f_{LC}'$ 、波圧計による6函分の平均波力波形(1函の波力波形の時間平均) $f_{P}'$ で、すべて同じ1波を対象として示している。時間平均をとると、切り立ったピークは完全になくなり、滑らかな波形となるが、ピーク値を比較すると、空間平均の場合とほとんど同じである。ここに示した以外のデータについても、空間平均の場合とほとんど同じか、わずかに小さめの値であった。また、波圧計のデータについて

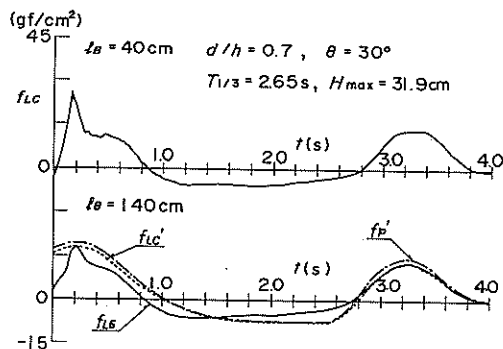


図-20 水平波力の空間平均と時間平均

も同様の傾向である。

図-21(a), (b)は、水平波力の平滑化係数 $\delta_B$ について、前述した合田式に基づく計算値と実験値を比較したもので、 $\delta_B$ の実験値の求め方は直立堤実験の場合と同様である。 $\alpha_2$ の値が2種類あるが、これは $d/h$ の違いによるもので、波高はどのケースもほとんど同じである。実験値は多少ばらついているが、全体としては計算値とほぼ一致しており、特に相対長さの小さい場合の傾向がよく合っている。したがって、合田式における $\alpha_2$ の項を別途考慮した平滑化係数の算定法が妥当であることがわかる。なお、ここでは負の波力のピーク値として、 $-0.5H$ だけ水位が低下したときの波力ではなく、正の波力における $\alpha_2$ の項の値をそのまま用いて計算している。したがって、 $l_B \sin \theta / L > 0.5$ では、負の波力を考慮した場

合に比べて $\delta_B$ が小さくなる。図-21(b)において $l_B \sin \theta / L > 0.5$ で実験値のほうが大きくなっているのは、その影響と考えられる。また、合田式における $\alpha_2$ の項には波向きの影響も含まれるため、厳密には $\delta_B$ の計算曲線は波向きごとに異なり、図に示した値よりもやや大きくなるが、ここではその影響は考慮していない。

## (2) 揚圧力の平滑効果

長大ケーソンの波力平滑効果は、水平波力だけでなく揚圧力についても考慮できる。今回の実験では、揚圧力の測定はケーソン底版の前趾近くに取り付けた波圧計を用い、データの処理は分力計の場合と同様に行った。

図-22(a), (b)は、水平波力の場合と同様に、 $\theta = 30^\circ$ の場合について、ケーソン長 $l_B$ の違いによる揚圧力波形の変化の例を示したものである。ケーソン長が大きくな

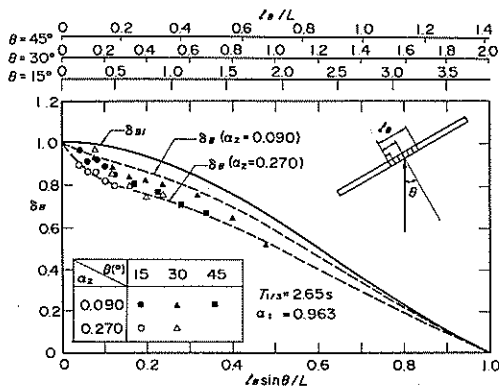


図-21(a) 水平波力の平滑効果(混成堤,  $T_{1/3} = 2.65\text{s}$ )

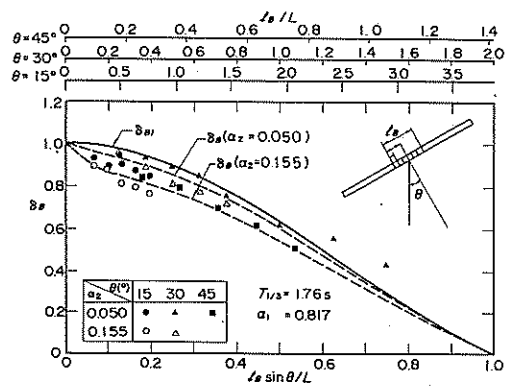


図-21(b) 水平波力の平滑効果(混成堤,  $T_{1/3} = 1.76\text{s}$ )

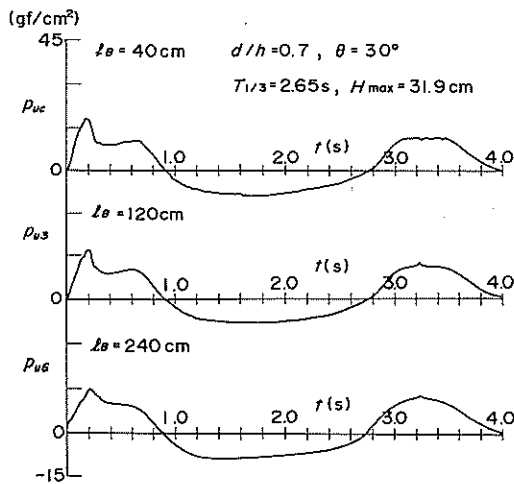


図-22(a) 揚圧力波形の変化(混成堤,  $d/h = 0.7$ )

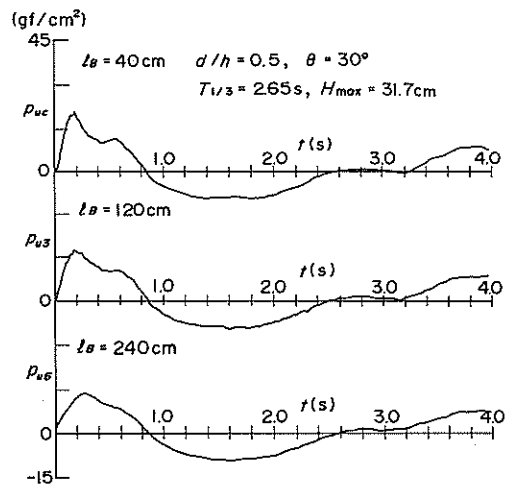


図-22(b) 揚圧力波形の変化(混成堤,  $d/h = 0.5$ )



るにつれてピークが減少する傾向は水平波力と同様であるが、水平波力の場合に比べてあまりピークの切り立ちが鋭くないため、長大化により減少する割合もやや小さい。すなわち、揚圧力はそれほど衝撃的な波力にはなりにくいことを意味しており、このことは、合田式でも、揚圧力の計算には $\alpha_2$ の項を含まないことにより考慮されている。したがって、平滑化係数も $\alpha_1$ の項、すなわち、水平波力における $\delta_{B1}$ のみを考慮することになる。

図-23(a), (b)は、揚圧力の平滑化係数 $\delta_{av}$ について、計算値と実験値を比較したものである。 $T_{1/3} = 2.65$  sの場合は、実験値は計算値よりも小さいが、 $T_{1/3} = 1.76$  sの場合はほぼ計算値と一致しており、計算値は全体と

して安全側である。なお、図-23(b)で $l_B \sin \theta / L > 0.5$ のとき実験値のほうが大きくなっているのは、水平波力の場合と同様に、負の揚圧力の影響を考慮していないためと考えられる。

### (3) 直角入射における波力特性

前項までは斜め入射波に対する長大ケーソンの波力平滑効果を検討してきたが、砕波のように局所的に大きな波力が作用する場合には、直角入射の場合であっても多少の平滑効果が生じる可能性がある。ここでは、直角入射の場合の波力特性について検討する。

図-24(a), (b)は、直角入射におけるケーソン長 $l_B$ の違いによる水平波力波形の変化の例を示したもので、 $d/h$

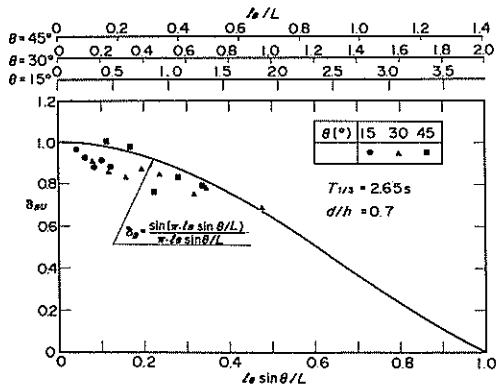


図-23(a) 揚圧力の平滑効果(混成堤,  $T_{1/3} = 2.65$  s)

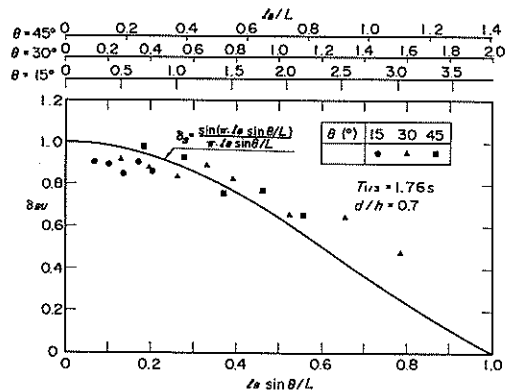


図-23(b) 揚圧力の平滑効果(混成堤,  $T_{1/3} = 1.76$  s)

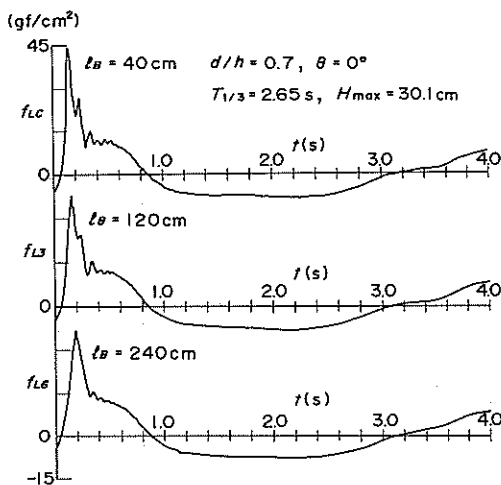


図-24(a) 水平波力波形の変化  
(直角入射,  $d/h = 0.7$ )

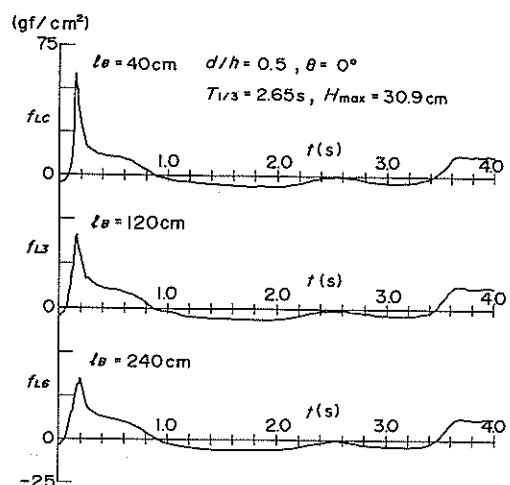


図-24(b) 水平波力波形の変化  
(直角入射,  $d/h = 0.5$ )

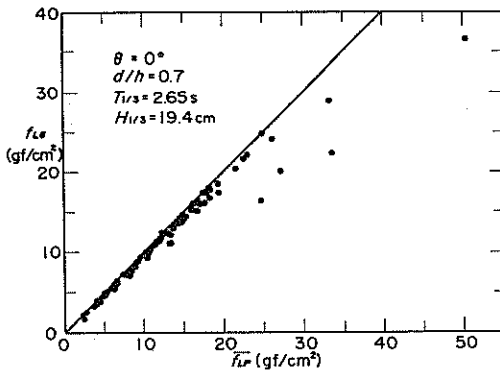


図-25(a) 直角入射の場合の波力平滑効果  
( $d/h = 0.7$ )

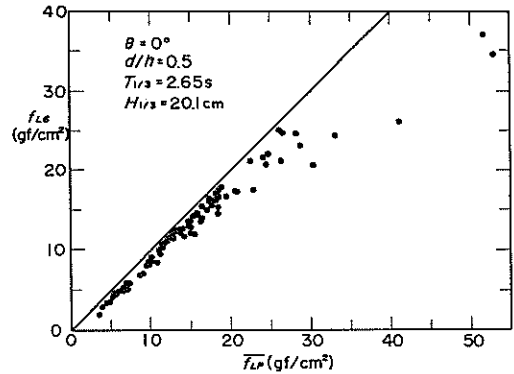


図-25(b) 直角入射の場合の波力平滑効果  
( $d/h = 0.5$ )

が0.7と0.5の場合についてそれぞれ示している。いずれの場合もケーソン長の増加による波力の低減が見られ、特に $d/h = 0.5$ の場合は切り立ったピークの減衰が顕著である。このことから、衝撃性の強い波力の場合には、直角入射でも平滑効果があるものと考えられる。

図-25(a), (b)は、1函ごとの水平波力強度 $f_L$ を6函分平均した値と、6函分の同時平均水平波力 $f_{L6}$ の相関を、直角入射のケースについて示したものである。平均波力強度が $20\text{gf/cm}^2$ 以下のデータについては、 $d/h = 0.5$ の場合はやや $f_{L6}$ のほうがいずれも小さいけれども、全体的にはほぼ1対1の相関があり、平滑効果はほとんどないといってよい。これに対して、平均波力強度が $20\text{gf/cm}^2$ 以上になると $f_{L6}$ のほうがかなり小さいデータが多くなり、平滑効果が現われていることがわかる。ただし、ばらつきも大きく、必ずしも平滑効果が現われない場合もある。衝撃性の強い波力は、通常のケーソンに作用する場合でも、わずかな条件の変化による波力のばらつきが大きく、合田式による計算値を上回ることもある。したがって、今回の結果だけから直角入射に対する波力の平滑効果を定量的に示すことは危険であり、さらに検討の必要があると思われる。ただし、衝撃的な波力に対して多少の平滑効果があり、ケーソンの安定性の向上に寄与することは明らかである。

## 5. 滑動実験

### 5.1. 実験方法

前章では、測定された波力によって波力平滑効果を検討したが、ケーソンの長大化による耐波安定性の向上および回転の影響については、滑動実験により検討する必要がある。

滑動実験は、混成堤の波力測定実験と同じ断面で行った。滑動量測定の対象としたのは、波力測定実験で用いたモルタル製底板付きの亚克力製ケーソン8函である。通常のケーソンのように1函ずつ独立して並べたもの(独立型)と、8函(320cm)をボルトで連結し、1函の長大ケーソンとしたもの(長大型)について行った。滑動量は、独立型については3つのケーソンで測定し、その平均値を求めた。また、長大型についてはケーソン両端の測定値の平均を滑動量とした。独立型、長大型ともに、波向きを $0^\circ$ から $45^\circ$ まで、ケーソン重量を3種類、波群を2種類、作用させる波の大きさを4~5段階( $H_{\max} = 20.8 \sim 32.6\text{cm}$ )に変えて行っている。また、波の作用時間を十分長くとるために、1ケースにつき有効波数500波程度とした。

### 5.2 波力の平滑化と滑動安定性

図-26(a)~(d)は、波向きごとに、独立型と長大型の滑動実験結果を示したものである。縦軸には1波群(500波程度)の波作用ごとの滑動量 $S$ を、横軸には平滑化の影響を考慮しない通常の合田式で計算される滑動安全率 $SF_c$ をとっている。したがって、通常の合田式による設計が妥当であれば、 $SF_c = 1.0$ が滑動限界となる。

$\theta = 0^\circ$ の場合、○で示した独立型と、●で示した長大型の差はなく、同じような傾向を示しており、この実験結果の範囲では、前章で検討した直角入射の場合の波力平滑効果はほとんどない。ただし、実際の海の波では、方向分散性や海底地形の影響などにより、必ずしも波峰線がそろわないため、設計上は直角入射であっても多少の平滑化は期待できるとも考えられる。滑動限界はいずれも $SF_c = 1.0 \sim 1.3$ であり、合田式による設計ではやや危険側である。これは実際に作用した波力が合田式の

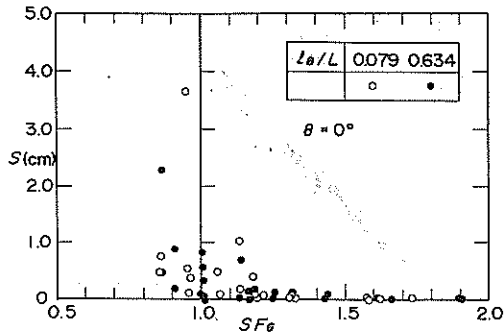


図-26(a) ケーソン長と滑动安定性 ( $\theta = 0^\circ$ )

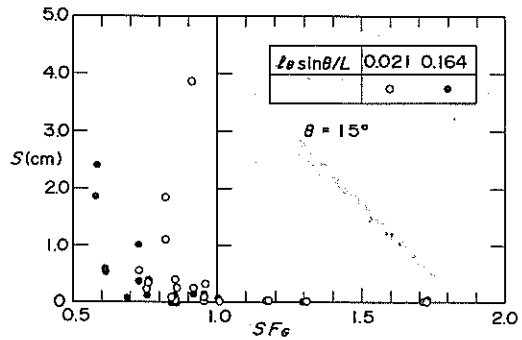


図-26(b) ケーソン長と滑动安定性 ( $\theta = 15^\circ$ )

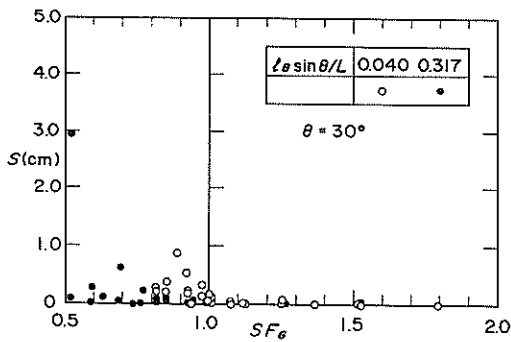


図-26(c) ケーソン長と滑动安定性 ( $\theta = 30^\circ$ )

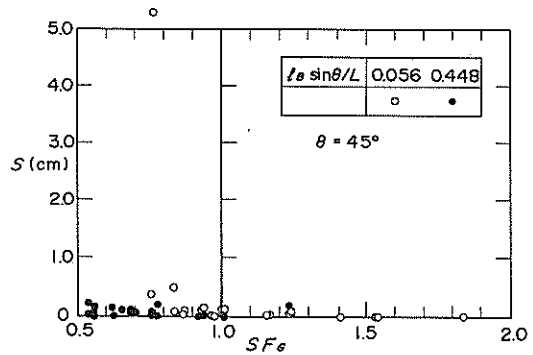


図-26(d) ケーソン長と滑动安定性 ( $\theta = 45^\circ$ )

計算値よりも大きかったことが原因である。波力測定実験において実際に測定した結果でも、計算値に比べて1～4割程度大きな波力が作用しており、特に波高が大きくなるにつれて、計算値との違いが大きくなっていった。

これに対し斜め入射波の場合は、波力平滑効果の影響でいずれの場合も長大型のほうが安定性が高い。独立型は $\theta = 15^\circ \sim 45^\circ$ いずれの場合も、 $SF_e = 1.0$ 付近が滑动限界となっており、従来の合田式による設計が妥当であることがわかる。一方、長大型のほうは、波向きが大きくなるほど安定性が向上しており、滑动限界は $15^\circ$ では $SF_e = 1.0$ 、 $30^\circ$ で $0.8 \sim 0.9$ である。さらに $45^\circ$ については、 $SF_e = 0.55$ でも模型量で2 mm程度の滑动しか生じていない。これらの結果から、長大型の場合、通常の合田式による計算では明らかに過大設計となることがわかる。

次に、長大化による波力平滑化を考慮した設計法を用

いて滑动安定性の再検討を行う。図-27は、横軸に平滑効果を考慮した滑动安全率 $SF_e$ をとり、滑动量 $S$ を示したものである。図-26に比べて、波向きによる安定性の

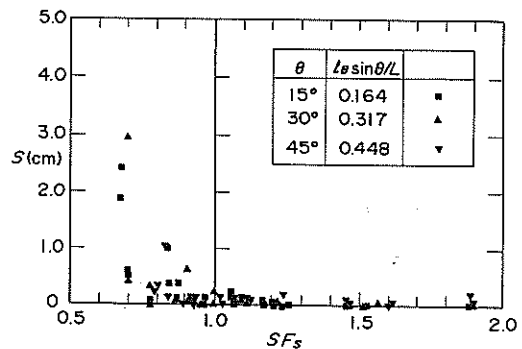


図-27 波力平滑効果を考慮した滑动安全率と滑动量

違いがなく、全体として $SF_s = 1.0$ 付近が滑動限界となっている。なお、 $SF_s > 1.0$ の場合でも1~2mmのわずかな滑動が見られる場合もあるが、これは長大型の場合だけではなく、通常のケーソンの場合にも見られる実験結果のばらつきである。

### 5.3 滑動安定性に対する回転の影響

3章において、滑動安全率が1.0以上であっても、理論上は回転によりケーソンが動く可能性があることを述べた。しかし、実際に回転力による滑動が起こるのか、実験結果で検討する必要がある。

図-28は、横軸に回転安全率 $SF_R$ を、縦軸に滑動量 $S$ をとって示した結果である。ただし、ここでは回転による変位も考慮するために、滑動量はケーソン両端の測定値のうち大きいほうの値で定義している。黒で示したのは滑動安全率 $SF_s$ が1.0以上、白抜きは1.0未満を表している。 $SF_s > 1.0$ かつ $SF_R \leq 1.0$ で滑動した場合は、これを回転の影響による変位と考える。

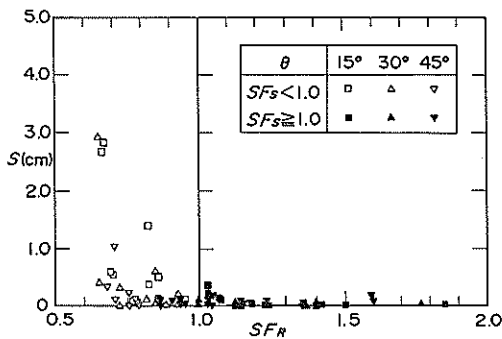


図-28 回転安全率と滑動量

45°の場合、 $SF_s > 1.0$ で $SF_R \leq 1.0$ のデータがいくつかあるが、滑動量はいずれも0~2mm程度と非常に小さい。したがって、今回のデータを見る限り、少なくとも回転安全率0.85程度までは回転の影響による変位はほとんどないと考えられる。

通常の設計においては、滑動安全率を1.2とすることが多いが、今回の実験結果を考慮すると、回転安全率は1.0程度でもよいと考えられる。ただし今回は実験データの数が少なく、ケーソンの相対長さがより長い場合について実験を行っていないため、回転力による変位については十分でなく、さらに検討が必要である。

## 6. 耐波安定性に関する設計法

前章まで長大ケーソンの波力平滑効果および回転の影響について検討してきたが、実際の設計手順について再度まとめると次のようになる。

- ① 通常の合田式を用いて、ケーソン単位長さあたりの水平波力 $P_0$ および揚圧力 $U_0$ を求める。
- ② 今回提案した算法により、波力平滑化係数 $\delta_b$ および $\delta_{bu}$ を求める(式(3))。 $l_b \sin \theta / L > 0.5$ の場合は、負の波力として前面水位が0.5H低下したときの波力を考慮する必要がある。
- ③ ケーソンに作用する平均波力を計算する。設計水平波力を $P_0$ 、揚圧力を $U_0$ とすれば、 $P_0 = \delta_b P_0$ 、 $U_0 = \delta_{bu} U_0$ である。
- ④ 滑動に対する安定性を検討する。静水時における単位長さあたりのケーソン重量を $w'$ とすれば、滑動安全率 $SF_s$ は次式で計算される。

$$SF_s = \mu (w' - U_0) / P_0$$

$\mu$ は摩擦係数で、通常0.6である。滑動安定性は、 $SF_s \geq 1.2$ であればよい。もし、1.2よりも小さい場合はケーソンの重量を増加させる必要がある。

- ⑤ 平面的な回転に対する安定性を検討する。ある時刻におけるケーソンの回転中心の位置を、水平波力と揚圧力の分布から計算で求める(式(2))。
- ⑥ ケーソンの抵抗力、すなわち限界合成波力 $F_{cL}$ を求め、実際の水平波力と揚圧力から計算される合成波力 $F_c$ の比で、回転安全率 $SF_R$ を求める(式(2))。
- ⑦ ⑤、⑥の計算を1周期分について行い、その中で最小となる $SF_R$ が1.0より小さくならないことを確認する。もし、1.0より小さい場合はケーソンの重量を増加させる必要がある。

なお、波向きについては、回転安定性の検討の場合も合田式で用いる $\beta$ 、すなわち、波力が大きくなる方向へ15°補正した値を用いればよい。また、ケーソンの相対長さ $l_b \sin \theta / L$ が0.5以下であれば、回転に対する検討は省略してよい。

なお、ケーソンの耐波設計においては、通常の断面的な回転(転倒)なども検討しなければならないことは当然であるが、ここではそれらについては省略している。

## 7. あとがき

本研究により、長大ケーソンによる波力平滑効果および回転の影響を明らかにし、実際の設計で用いる波力平滑化係数の算法と、回転安定性の検討法を提案した。

今後、長大ケーソンの実用化にあたっては、ケーソンの部材設計が重要となるが、その場合にもここで提案した波力や抵抗力の時間的・空間的な分布を用いることができると考えられる。なお、今回の研究ではケーソン前面を消波ブロックで被覆した場合については検討していないが、通常的设计において $\alpha_2$ を0としているので、長大ケーソンの場合も $\alpha_1$ の項の平滑効果のみを考慮すればよいと考えられる。実用化のためには、このほか基礎マウンドの不陸や不等沈下の影響についても検討する必要がある。

本研究は運輸省第三港湾建設局の依頼で行ったものであり、片岡真二神戸調査設計事務所長、白石修章次長、高橋浩二技術開発課長を始め各位から御指導を得ている。また、合田良実横浜国大教授、谷本勝利港湾技術研究所水工部長にも貴重な御助言を得ている。実験の実施およびデータ整理には、耐波研究室の佐々木均技官の協力を得た。ここに記して感謝の意を表する。

#### 参 考 文 献

- 1) The Institution of civil engineers : The Civil Engineer in War, Vol. 2, Docks and Harbours, 1948, pp. 291~312, 336~368.
- 2) 運輸省第二港湾建設部：八戸港沈船防波堤工事誌, 1950, 68p.
- 3) 高橋重雄・明瀬一行：波力発電ケーソンの空気出力に及ぼす波向きと平面配置の影響, 第33回海岸工学講演会論文集, 1986, pp. 501~505.
- 4) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説 改訂版(上巻), 日本港湾協会, 1989, pp. 119~125.
- 5) 谷本勝利：混成防波堤に作用する波力について, 昭和51年度港湾技術研究所講演会講演集, 1976, pp. 1~26.

#### 主要記号一覧表

$d$  : マウンド上の水深  
 $F_c$  : 合成波力  
 $F_{c_0}$  : 回転に対する限界合成波力

$F_H$  : 全水平波力  
 $F_V$  : 全鉛直波力  
 $f$  : 周波数  
 $f_L$  : 分力計による平均波力強度  
 $f_{L3}$  : 分力計によるケーソン3函分の平均波力強度  
 $f_{L6}$  : 分力計によるケーソン6函分の平均波力強度  
 $f_{L12}$  : 分力計によるケーソン12函分の平均波力強度  
 $f_p$  : 波圧計による平均波力強度  
 $H$  : 波高  
 $H_{1/3}$  : 有義波高  
 $H_{1/10}$  : 1/10最大波高  
 $H_{max}$  : 最高波高  
 $h$  : 水深  
 $L$  : 波長  
 $L_{1/3}$  : 有義波波長  
 $l$  : ケーソン中心から荷重作用点までの長さ  
 $l_B$  : ケーソン長  
 $l_x$  : ケーソン端から回転の中心までの長さ  
 $P_{0.0}$  : ケーソン中心に作用する滑動限界荷重  
 $P_r$  : 回転に対する限界荷重  
 $P_1$  : 合田式による静水面での波圧  
 $S$  : 滑動量  
 $S(f)$  : スペクトル密度  
 $SF_c$  : 合田式による滑動安全率  
 $SF_R$  : 回転安全率  
 $SF_s$  : 平滑効果を考慮した滑動安全率  
 $T$  : 周期  
 $T_{1/3}$  : 有義波周期  
 $t$  : 時間  
 $W$  : ケーソンの水中重量  
 $w_0$  : 海水の単位体積重量  
 $w'$  : 単位長さあたりのケーソンの水中重量  
 $\alpha_1$  : 合田式で静水面の波圧の算定に用いるパラメータ  
 $\alpha_2$  : 合田式で海底勾配やマウンドの影響を表わすパラメータ  
 $\beta$  : 波向き  
 $\gamma$  : 合田式における $\alpha_2$ の項と $\alpha_1$ の項の比  
 $\delta_B$  : 波力平滑化係数  
 $\delta_{B1}$  :  $\alpha_1$ の項の波力平滑化係数  
 $\delta_{B2}$  :  $\alpha_2$ の項の波力平滑化係数  
 $\delta_{BU}$  : 揚圧力の波力平滑化係数  
 $\theta$  : 波向き  
 $\mu$  : ケーソンとマウンドの摩擦係数

港湾技研資料 No.685

1990・9

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 ニッセイエプロ株式会社

Published by the Port and Harbour Research Institute  
Nagase, Yokosuka, Japan.