

ケーソンの長大化による波力の低減と耐波安定性の向上

高橋 重雄*・下迫 健一郎**

1. まえがき

従来の混成防波堤のケーソンは、1函の法線方向の長さが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限されている。しかしながら、これらの問題点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。こうした長大型のケーソンの例としては、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（たとえば「八戸港沈船防波堤工事誌」（1950））。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ほとんどなく、当然ながら設計法も確立されていない。

長大型ケーソンは、通常のケーソンに比べて、工期が短縮できることや、移設転用が容易であることのほかに、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と考えられる。

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 β 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の低減を表したものであり、長大型ケーソンの影響を考慮したものではない。

本研究は、長大型ケーソンに関して、理論的、実験的検討を行い、作用する波力の低減効果および耐波安定性を検討し、波力算定法を提案するものである。

2. 波力低減効果の理論

(1) 長大型ケーソンによる波力の平滑化

長大型ケーソンにおける波力の低減効果は、図-1に示すように、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

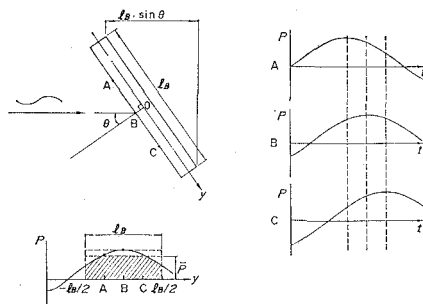


図-1 長大型ケーソンの波力の平滑化

る。たとえばB点において波力がピークとなったとき、その波力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。この波力の低減は空間的な平均をとることによるものであり、波力の平滑化とよんでいる。ケーソンの長さを l_B 、波の入射角を θ 、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、波力の平滑化係数 δ_B はケーソン相対長さ $l_B \sin \theta / L$ によって次式で表される。

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

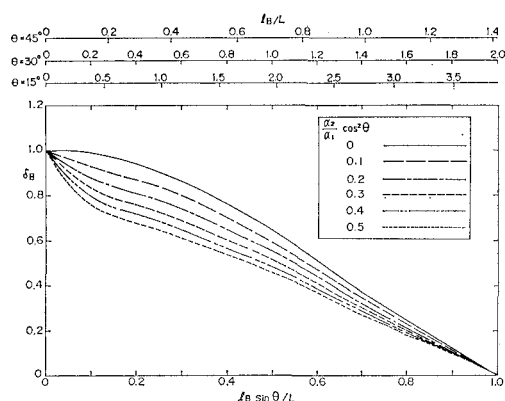


図-2 波力平滑化係数

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所耐波研究室長

** 正会員 運輸省港湾技術研究所耐波研究室

図-2 における実線は、横軸にケーソンの相対長さをとって、波力の平滑化係数を示したもので、図の上側には $\theta=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ のとき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、 $15^\circ, 45^\circ$ 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° の場合で84m程度のケーソン長となる。なお式(1)は、高橋ら(1986)がケーソンの長さによる入射波パワーの平滑化を検討した式である。

(2) 合田式に基づく波力の平滑化係数

実際に作用する波力は正弦波形ではなく、いわゆる双峰型の波形となる。特にマウンドが高く波高が大きい場合には、波圧波形のピークが切り立ち、作用時間の短い衝撃的な波力が作用する。したがって通常の設計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。

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

上式の α_1 は重複波圧的な成分を表す。また、 α_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、 β は危険側へ 15° 補正した波向きであり、ここでは式(1)で用いている θ 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、合田式に基づいた、より現実に近い波形として、図-3に示すように α_1 の項のみを正弦波とし、 α_2 の項は作用時間が周期 T の $1/20$ の三角波として付け加えた波形を考える。この場合、波力の平滑化係数は、ケーソンの相対長さだけでなく、 α_2 と α_1 の比によっても異なり、次式で表される。

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

ここに、 $\gamma = \alpha_2 \cos^2 \beta / \alpha_1$ であり、 δ_{B1}, δ_{B2} はそれぞれ次式で定義される α_1, α_2 の項の平滑化係数である。

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

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

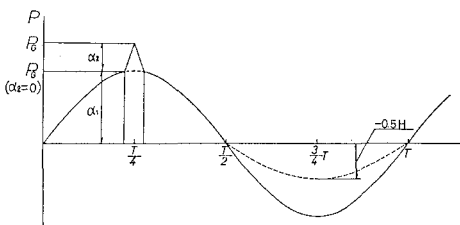


図-3 合田式に基づく波力波形

図-2 にはこの計算法による δ_B の値も示している。ただし、 $\gamma=0$ のときは正弦波形による結果と同じになる。 α_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たことがわかる。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-3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。ただし、その影響が現われるのは $l_B \sin \theta / L > 0.5$ のときであり、図-2 では特に考慮していない。

3. 回転に対する安定性

(1) 回転による滑動限界荷重

ケーソンに働く波力が法線方向に位相差のある場合、ケーソンの両端で波力の大きさと向きが異なるため、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、長大型ケーソンの場合、この回転力によってケーソンが実際に回転する可能性がある。

図-4 は、ケーソンに集中荷重が作用した場合の反力、すなわち摩擦による抵抗力の分布を示したもので、左の図はケーソンの中心に滑動限界荷重 P_{oe} が作用した場合である。一方、右の図は中心から l だけ離れた位置に回転に対する滑動限界荷重 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 の値は、力とモーメントの釣り合いから計算でき、次式で表される。

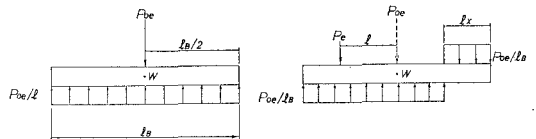


図-4 集中荷重に対する反力分布

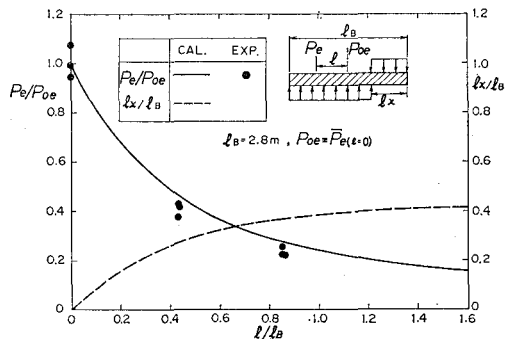


図-5 荷重の作用位置と限界荷重

$$P_e P_{0e} = \sqrt{4(l/l_B)^2 + 1} - 2l/l_B \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$l_x/l_B = l/l_B + (1 - \sqrt{4(l/l_B)^2 + 1})/2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

図-5はこの計算値と、実際にケーソンに集中荷重を作用させて滑動限界を調べた載荷実験結果を合わせて示したものである。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、中心の場合の半分以下の荷重で回転が生じてしまう。計算値と実験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。実際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。

(2) 回転を考慮した波力低減

ケーソンが長い場合には、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波力の合力の大きさを P 、中心からの作用位置のずれを l として、その作用位置で回転が生じるときの限界荷重 P_e と波力合力 P の比を、ケーソンの回転に対する安全率と定義する。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、回転力は波力合力がピークになる時ではなく、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。また、これ以後 P や P_e はケーソン長 l_B で除した単位長さあたりの波力を表している。

回転を考慮すると、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。たとえば $l_B \sin \theta / l$ が 1 の場合に δ_B は 0 となるが、この場合は明らかに回転力によって設計波力が決まってくる。図-6 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はの

うが δ_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、通常の設計では滑動安全率を 1.2 にとっているため、回転安全率も同じにとっ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。したがって、安全率を 1.0 とした場合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決まり、それより長い場合は回転で決まることがわかる。すなわち、 δ_B は 0.7 程度が下限と考えられる。

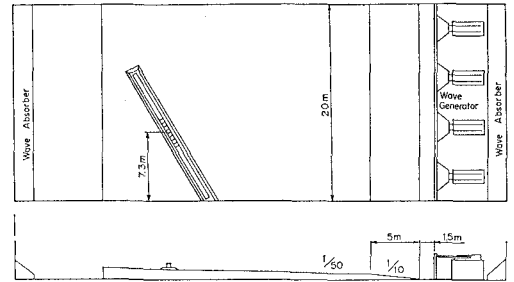


図-7 実験水槽

4. 水理模型実験

(1) 実験の方法

実際の波力低減効果および耐波安定性を検討するために、長さ 50m、幅 20m の平面水槽で水理模型実験を実施した。防波堤模型は、捨石マウンドの上に長さ 40cm のアクリル製ケーソン 8 函とコンクリート製ケーソンを並べて形成した。図-7 にその配置を示している。堤体の断面形状は、中央部で水深 40cm、マウンド厚 9cm、ケーソンの天端高 14cm である。

実験は、波力測定実験と滑動実験の 2 つに大別される。波力測定実験では、防波堤中央部のアクリル製ケーソン 6 函に分力計を取り付け、ケーソン 1 函あたりに作用する波力を測定するとともに、複数個のケーソンの波力をコンピュータで平均することにより、ケーソン長を大きくした場合の平均波力を求めた。また滑動実験では、ケーソン 1 函の場合と、アクリル製ケーソン 8 函をボルトで連結して長さ 320cm の長大型ケーソンとした場合の 2 種類について、ケーソンの重量と、波高および

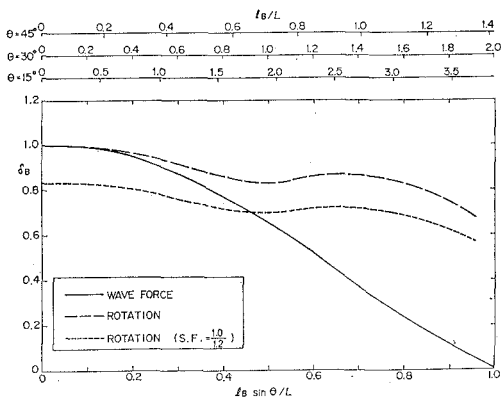


図-6 回転を考慮した波力平滑化係数

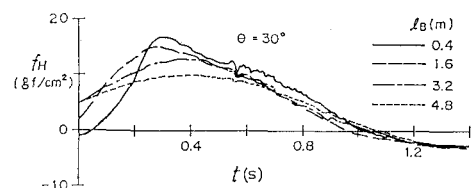


図-8 測定波力波形の例

波向きを変えて滑動量を測定した。

(2) 波力低減効果

図-8 は、ケーソン長の違いによる波力波形の違いを示したもので、 $\theta=30^\circ$ の場合の例である。ケーソンが長くなるにつれて波力が平滑化され、ピーク時の波力が小さくなり、波形がなめらかになってくることがわかる。

図-9 は、ケーソンの相対長さを横軸に、波力平滑化係数を縦軸にとり、計算値と実験値を比較したものである。図中の実線は正弦波形による計算値、破線は合田式に基づく算定法による計算値である。なお、2種類の α_2 の値が示されているが、 $\alpha_2=0.270$ のほうは、マウンドの前面にブロックを並べてケーソン前面の水深を浅くし、強制的に碎波を促進したケースである。

実験結果は、正弦波形による計算結果とよく似た傾向を示しているが、やや小さめの値となっている。これに対して、合田式に基づく計算結果とはよく一致しており、マウンド等の影響が適切に考慮されていることがわかる。

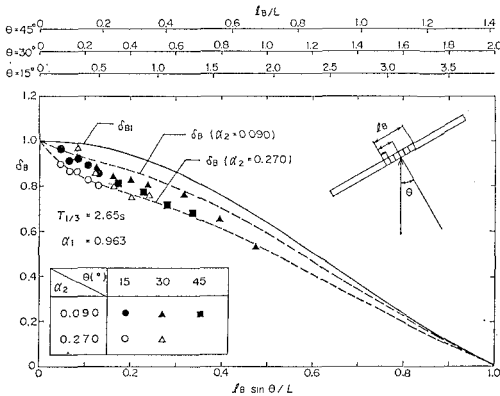


図-9 波力平滑化係数の計算値と実験値

(3) 滑動安定性

ケーソンの長大化による安定性の向上については、滑動実験により検討する必要がある。図-10 は、波向き θ が 0° と 30° の2種に対して、ケーソン長が40cm(1函分)の場合と320cm(8函分)の場合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 $S.F.$ をとっている。したがって、合田式による設計が妥当であれば、 $S.F.=1.0$ が滑動限界となる。なお、40cmのケーソンの滑動量は、同時に測定した3函の滑動量の平均値を、また、320cmのほうの滑動量はケーソンの両端で測定した値の平均を用いている。

$\theta=30^\circ$ の場合、40cmのケーソンでは $S.F.=1.0$ 付近が滑動限界となっているが、320cmの長大型ケー

ソンでは $S.F.=0.8$ 付近が滑動限界であり、通常の合田式による計算では明らかに過大設計である。すなわち、ケーソンの長大化により、滑動安定性が向上していることがわかる。

これに対して $\theta=0^\circ$ の場合、ケーソン長の違いによる安定性の差はほとんどなく、波力が平滑化されていないことがわかる。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、入射角が 0° であっても多少の平滑化が期待できるとも考えられる。しかしながら、今回の滑動実験や、別に行ったマウンドのない状態で多方向不規則波を作用させた波力測定実験でも、明確な違いは確認できなかった。

なお、 $\theta=0^\circ$ では $S.F.=1.2$ でも滑動する場合があり、危険側の結果となった。これは直角入射の場合、衝撃的な波力が生じ易く、実際に作用した波力が合田式の値よりもやや大きかったためである。

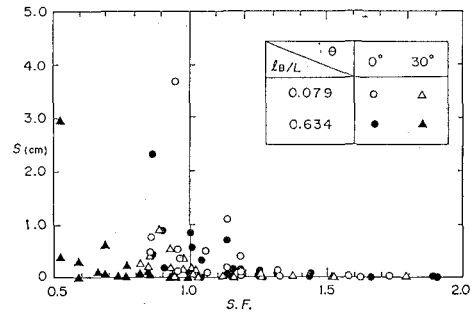


図-10 平滑化を考慮しない滑動安全率と滑動量

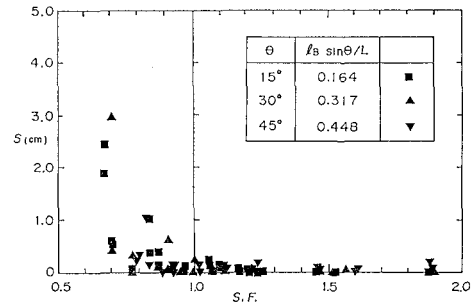


図-11 平滑化を考慮した滑動安全率と滑動量

次に、滑動実験結果を波力の平滑化を考慮した算定法で検討する。図-11 は、ケーソン長320cmの長大型ケーソンの滑動実験結果を示したもので、横軸には平滑化を考慮した算定法による滑動安全率をとっている。安全率が1.0よりも大きい場合でも、数mm程度滑動するケースもみられるが、滑動量が増加し始めるのは安全率1.0以下の領域である。すなわち滑動限界の理論値と実験値がよく一致しており、今回の算定法が滑動安定性からみても妥当であることがわかる。

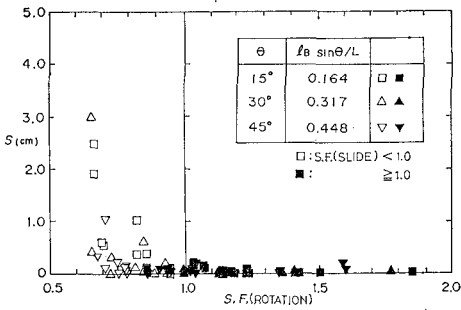


図-12 回転安全率と滑動量

図-12 は、横軸を回転安全率で示した結果で、黒で示したのは滑動安全率が1.0以上、白抜きは1.0未満を表している。したがって白抜きの変位は、通常の滑動によるものと考えてよい。45°の場合、滑動安全率が1.0以上で回転安全率が1.0未満のデータがいくつかあるが、いずれも1mm程度の滑動であり、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てよい。これは、回転の中心位置が時間とともに変化するため、ケーソン全体としては、ほとんど動かないか、動いてもごくわずかな量でおさえられるためである。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、回転安全率は1.0でもよいと考えられる。これについてはさらに検討が必要である。

5. 設計における滑動と回転の検討法

実際に長大型ケーソンの設計を行う場合は、滑動安定性の検討を行い、ケーソンの所要重量を求め、その後回転の安全性を検討すればよい。すなわち、

①合田式による水平波力 P_G と揚圧力 U_G を求める。また平滑化係数 δ_B と δ_{B1} を求め、ケーソンに作用する波力を計算する。さらに滑動に対する所要重量(静水時、単位長さあたり) W_0 を次式で求める。

$$W_0 = \delta_B (S.F.) P_G / \mu + \delta_{B1} U_G \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに (S.F.) は滑動に対する安全率で1.2であり、 μ は摩擦係数 (=0.6) である。

②ケーソンに作用する水平波力 P_{yt} (単位長さあたり) が、図-3のような時間的・空間的変化をすると考える。すなわち

$$P_{yt} = \begin{cases} P_{G1} \sin 2\pi\xi & : \text{領域 I} \\ P_{G1} \sin 2\pi\xi + P_{G2}(1 - |1/4 - \xi|) & : \text{領域 II} \\ P_{G3} \sin 2\pi\xi & : \text{領域 III} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 $\xi = t/T - y \sin \theta / L$ であり、 P_G の添字の1と2はそれぞれ α_1 と α_2 の項による合田式の波力を、3は負の波力を示す。また、領域Iは ($0 \leq \xi < 9/40$, $11/40 \leq \xi < 1/2$)、領域IIは ($9/40 \leq \xi < 11/40$)、領域IIIは

($1/2 \leq \xi < 1$) である。

③揚圧力 U_{yt} についても、水平波力と同様な時間的・空間的変化を考える。ただし、揚圧力では α_2 の成分は考えない。

④波の一周期の各時間ステップごとに、ケーソンに作用する水平波力の合力 P とその作用位置 l を計算する。ただし、合力は単位長さあたりの平均値として表す。

また、水平波力の作用位置が l にあったときの抵抗力の限界値 P_e を、次の二つの式から求める。

$$P_e = \frac{1}{l_B} \left[\int_{-l_B/2}^{l_B/2 - l_x} \mu (W_0 - U_{yt}) dy - \int_{l_B/2 - l_x}^{l_B/2} \mu (W_0 - U_{yt}) dy \right] \quad \dots\dots\dots (10)$$
$$P_e (l_B/2 + l - l_x) = \frac{1}{l_B} \left[\int_{-l_B/2}^{l_B/2 - l_x} \mu (W_0 - U_{yt}) \left(\frac{l_B}{2} - y - l_x \right) dy - \int_{l_B/2 - l_x}^{l_B/2} \mu (W_0 - U_{yt}) \left(\frac{l_x}{2} - y - l_x \right) dy \right] \quad \dots\dots\dots (11)$$

ただし、上式は数値的に解き P_e と l_x を同時に求める必要がある。しかしながら、揚圧力の変化が小さく図-4のような反力の分布を仮定できれば、式(6)と(7)の様に簡単な式となる。

⑤各時間ステップごとの回転に対する安全率を P_e/P によって計算し、その一周期内での最小値を求める。この値が1.0以下となる場合は、堤体重量を増加する必要がある。

なお、計算に用いる波向きは、従来の設計と同様に危険側に15°補正したものをを用いる。また、単純に $P_{yt} = P_G \sin 2\pi\xi$ としても、安全率の誤差は比較的小さい。

6. あとがき

本研究により、長大型のケーソンによる波力の平滑効果を明らかにするとともに、回転の影響を明らかにした。今後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。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、片岡眞二神戸調査設計事務所長を始め各位から御指導を得ている。また、合田良実横浜国立大学教授、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。ここに記して深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 運輸省第二港湾建設部 (1950): 八戸港沈船防波堤工事誌。
- 高橋重雄・明瀬一行 (1986): 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, pp. 501~505。