

二重円筒型波浪制御構造物に働く不規則波力

谷 本 勝 利*・ 下 迫 健 一 郎**・ 宮 崎 啓 司**

1. ま え が き

海域静穏化構想など海洋空間の有効利用を促進するために、水深 30~50 m 程度の外海大水深域における経済的な新しい波浪制御構造物の開発が期待されている。そのため、これまで各種の構造物について水理実験を実施するとともに試設計などを行ってきた¹⁾。本研究はこれらのうちで経済性、施工性ともに優れた二重円筒構造物について、不規則波による波力の特性を明らかにし、設計波力の算定法を検討するものである。

2. 実験の概要

(1) 対象とする構造物

二重円筒型波浪制御構造物は図-1に示すように基部ケーソンの上を二重円筒構造とし、かつ外側円筒壁の上方部分に適当な孔を開けて透過性にして、不透過の内側円筒壁との間をドーナツ状の遊水室としたものである。以後これを簡単に二重円筒ケーソンと称し、外壁に孔の開いている上方部分を透過円筒部、孔の開いていない下方部分を不透過円筒部と呼ぶ。透過円筒部は前半分（波

の入射側）と後半分の開口率（それぞれ ε_f , ε_r と表記）を任意に選択可能で、前後ともに孔の開いている構造を透過型、後半分を不透過（ $\varepsilon_r=0$ ）とした構造を消波型と呼ぶ。実験に使用した模型は、円筒部がアクリルおよび塩化ビニール製、基部ケーソンが鋼製のものである。外側、内側の円筒の外寸直径はそれぞれ 98 cm, 50 cm で、高さは基部ケーソン、不透過円筒部、透過円筒部いずれも 50 cm, 全高 150 cm の模型である。

(2) 実験の方法と実験条件

実験は幅 1.0 m, 長さ 163 m の長水路で行った。造波機は低慣性直流電動機駆動のピストン形式で、入力信号に追従して不規則波を発生させることができる。本研究においては、波力実験に先立ち、まず消波性能の面から最適な開口率を検討するために、 ε_f と ε_r を 0~0.4 の範囲で適当に組み合わせた条件で反射・伝達波実験を行い、次式で定義するエネルギー消費率（ K_{loss} ）を比較した。

$$K_{loss}=1-K_R^2-K_T^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 K_R は反射率、 K_T は伝達率である。その結果、相対水深 $h/L_{1/3}$ が 0.14~0.48 の条件に対して、透過型については $\varepsilon_f=0.25$, $\varepsilon_r=0.10$ 、消波型では $\varepsilon_f=0.25$ の場合、エネルギー消費率がそれぞれ 56~72%, 64~75% で最も高かった。波力実験はこれらのほか $\varepsilon_f=\varepsilon_r=0.25$ の透過型、および $\varepsilon_f=\varepsilon_r=0$ の不透過型を加えた 4 条件を対象とした。

波力の測定は波圧計や歪ゲージによる局所的な強度、全波力測定装置による基部ケーソンより上の円筒部に働く全波力（水平および鉛直成分）に対し同時に行った。水深（ h ）は 125 cm で一定である。実験波は有義波周期（ $T_{1/3}$ ）が 3 種の不規則波で、それぞれの相対水深（ $h/L_{1/3}$ ）は 0.140, 0.179, 0.234 である。波高は波形勾配（ $H_{1/3}/L_{1/3}$ ）が 0.012~0.036 の範囲で、各周期条件に対し、有義波高（ $H_{1/3}$ ）を 3 種に変化させた。これらの不規則波は各条件ごとに 200~250 波の波列を 3 波群ずつ用意し、結果は波力を含めてすべて 3 波群の平均値である。

なお、不規則波実験では波を長時間連続して作用させ

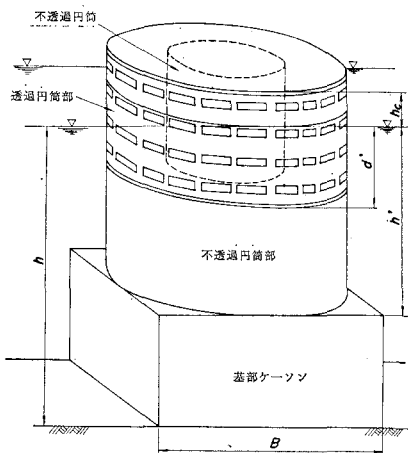


図-1 二重円筒型波浪制御構造物

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 水工部防波堤研究室長
** 運輸省港湾技術研究所 水工部防波堤研究室

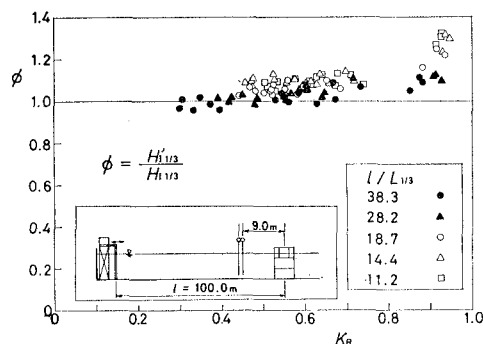


図-2 反射率と波高増幅率の関係

るため、造波板からの再反射波の影響が問題となる。これについては、200～250波の波を繰り返し連続して造波し、造波板と模型の間で形成される多重反射系が充分定常状態となるのを待って測定する手法をとった。したがって、この状態での構造物への入射波高は模型を設置しない状態で測定した通過波高とは一般に異なる。そのため、波力と同時に測定した構造物前方9m地点での波形から多重反射系での分離入射波高を求め、次式で定義した波高増幅率 ϕ を通過波高に乗じることによって、構造物への入射波高を与えた。

$$\phi = H'_{1/3}/H_{1/3} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $H'_{1/3}$ は構造物設置後の分離入射有義波高、 $H_{1/3}$ は構造物設置以前での通過有義波高である。図-2はこの波高増幅率を横軸に反射率 K_R をとってプロットしたものである。 ϕ の値は反射率が大きいほど、また周期が長いほど大きくなる傾向があるが、本条件の場合最大でも1.3程度である。

3. 波力特性

(1) 円筒部に働く波力

a) 水平波力の頻度分布

図-3は基部ケーソンを除いた円筒部に働く水平波力の1波ごとの正(押す方向)および負のピーク値の頻度分布を確率密度の形で示したものである。ただし、水平波力は投影面積 $(h' + h_e)B$ で割った平均波力強度 f_H' をさらに $w_0 H_{1/3}$ で割って無次元化してある。ここに、 h' は円筒部下端の静水面からの深さ、 h_e は天端高、 B は外側円筒の外寸直径、 w_0 は水の単位体積重量である。 $T_{1/3} = 2.35$ s, $H_{1/3} = 18.8 \sim 21.0$ cmの例で、上から透過型、消波型、不透過型に対応する。図中に波高と同様に定義した1/10最大波力強度($f'_{H/10}$)と1/3最大波力強度($f'_{H/3}$)の無次元値も示してある。ただし、正負をそれぞれ+、-を上付けして区別してあり、負の値は絶対値である。また、最大値($f'_{H\max}$)は3波群の平均値をと

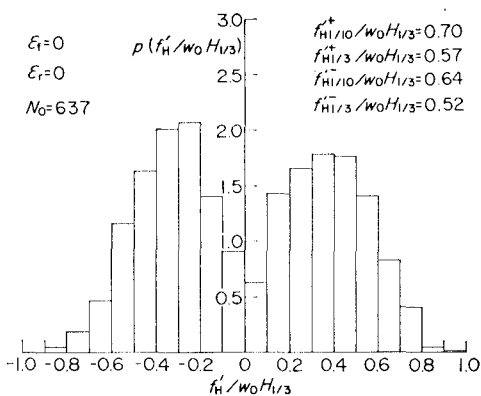
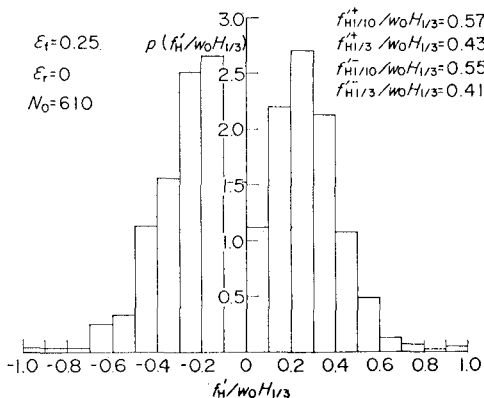
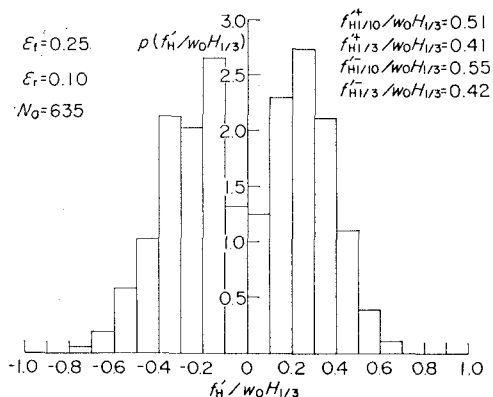


図-3 水平波力強度の頻度分布

ると、透過型、消波型、不透過型の正の無次元値($w_0 H_{1/3}$ で割った値)でそれぞれ0.62, 0.92, 0.91, 負の無次元値でそれぞれ0.71, 0.76, 0.80となる。これから特に透過型の波力が不透型の波力に比べて小さくなるのがわかる。消波型も全体には小さくなるが、正の最大値は変動が大きく、平均値はこの例の場合不透型と変わらない。

b) 波高と水平波力の関係

図-4は円筒部に働く水平平均波力強度 f_H' の代表値

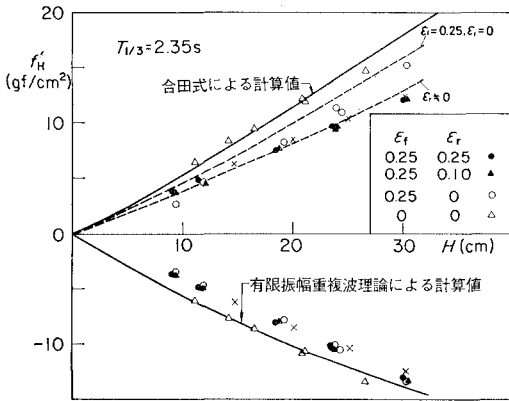


図-4 円筒部に働く水平波力強度

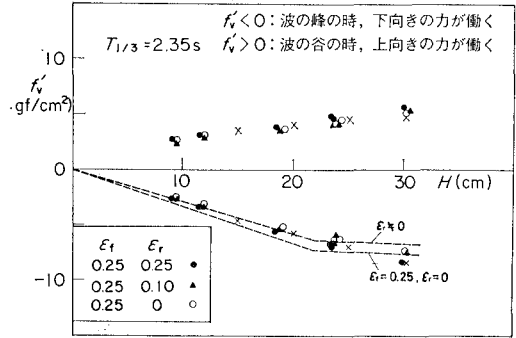


図-5 円筒部に働く鉛直波力強度

(1/10 最大値と 1/3 最大値) をそれぞれ対応する代表波高に対しプロットしたものである。また、図中の実線は同じ高さの直立壁に働く波力の計算値から求めた値で、正については後述する合田式、負については第 4 次近似の有限振幅重複波理論²⁾を用いた。破線は後述する消波型および透過型の設計波力の算定法による計算値である。合田式や有限振幅重複波理論による計算値は不透過型に対応するものであるが、いずれも実験値によく合っている。つまり、本実験で対象としているような大水深での不透過な円筒列構造物に働く波力は通常の直立壁に働く波力算定式で充分精度高く推定できることが確認できる。

一方、消波型や透過型の波力は正負ともに不透過型の波力よりもやや小さい。特に透過型の正の波力は不透過型の計算値に対して 67~75% に減じており、波力の低減効果が明らかである。これに対し、消波型の正の波力は波高が大きいきとき透過型よりやや大きい傾向にある。これはドーナツ状遊水室の後半分が不透過であるため、波高が大きくなると流入してきた水がそこで勢いよく衝突するためと考えられる。後述する設計波力の算定法では透過型と消波型でこの違いを考慮している。負の波力については透過型と消波型で差がない。なお、図中の×印のデータは先に実施した $\epsilon_f = \epsilon_r = 0.25$ の透過型に働く規則波による波力であるが、正負ともに今回の不規則波による波力とよく一致している。これは不規則波による波力であっても、有義波周期を持った規則波である程度検討できることを表している。ただし、不規則波による最大波力は規則波実験より変動が大ききという違いがある。

c) 波高と鉛直波力の関係

図-5 は円筒部（基部ケーソンの上面を含む）に働く波力の鉛直成分を B^2 で割った見掛けの平均波力強度 f_v' を同様にプロットしたものである。正のピークと負

のピーク値の両方を示してあるが、この場合上向きを正としている。透過型や反射型では波の峰のとき遊水室内に水が流入して下向きの波力が働き、基部ケーソンの底面に働く揚圧力を打ち消す効果が認められる。波の谷のときは水の流出によって遊水室底面などに負圧が作用するので正の波力となる。図中の破線は後述する設計波力の算定法によって求めた負の場合の波力強度であるが、実験値にはほぼ合っている。また、規則波実験による強度を×印で示しているけれども、この場合も不規則波実験結果とよく合っている。

(2) 基部ケーソン前面に働く波圧

図-6 は不透過型の基部ケーソン前面の中央（底面から 25 cm）での波圧の正負のピーク値と波高との関係を 3 種の周期条件に対し示したものである。プロットした点は円筒部と同じく 1/10 最大値と 1/3 最大値であり、図中の実線も正の波圧は合田式、負の波圧は有限振幅重複波理論による計算値を表す。ただし、有限振幅重複波理論による計算値は底面での値であるが、測定点での値とほとんど差がない。実験および計算による結果ともに周期の長いほうが波圧は大きく、正のピーク値で周期が長くかつ波高の大きい条件で計算値がやや大きい傾向があるものの、全体では実験値に非常によく合っている。正と負の波圧を比較すると、絶対値はいずれも負の値が大きく、周期が 2.84 s のとき正の波圧の 1.15 倍、2.35 s のとき 1.25 倍、1.95 s のとき 1.3 倍程度と周期が短いほどその傾向が顕著となる。これは大水深重複波の作用条件下での著しい特徴で、理論的には既に合田²⁾が有限振幅重複波理論の計算に基づいて指摘していたところである。また、筆者らは当該構造物とは異なるが、大水深の混成堤を対象とした滑動実験を行って、条件によってケーソンが岸側でなく沖側へ滑動することを確認している。こうした大水深防波堤の特徴は安定性の面のみならず部材の強度設計に極めて重要であり、今後、ともすれば軽視しがちであった負の波力の算定法にも目を向ける

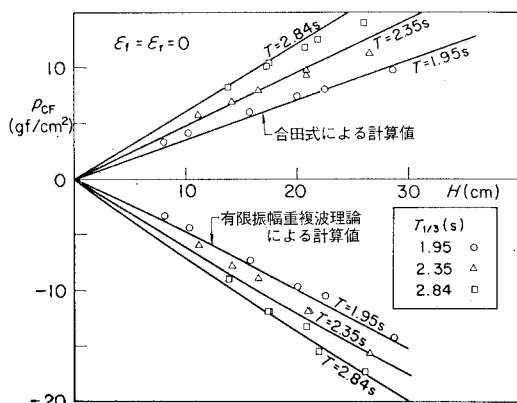


図-6 基部ケーソン前面に働く波圧

べきであることを改めて指摘できる。ここでは示していないが、透過型と消波型に対しては、正の波圧は合田式による計算値の約9割、負の波圧は透過型で有限振幅重複波理論の約9割、消波型で約8割程度である。

(3) 二重円筒ケーソン全体に働く滑動合成波力

これまで円筒部と基部ケーソンに働く波力を別々に見たが、ここでは全体に働く波力について検討する。一般に壁体には水平波力と鉛直波力が働き、安定性はその合成波力で評価される。特に、鉛直波力が底面に働く揚圧力のみならず、構造内部で波力の鉛直成分が生じるような構造形式ではこの合成波力の評価が重要である。当該構造の場合、滑動安定性が重要であるので、以下滑動安定性に対する合成波力についてのみ示す。滑動合成波力強度 f_s は次式（±は F_H の正負に対応）で表される。

$$f_s = (F_H \pm \mu F_V) / (h + h_0) \quad (3)$$

ここに、 F_H は延長方向単位長さあたりの水平波力（押す方向を正）、 F_V は同鉛直波力（上向きを正）、 μ は摩擦係数（=0.6）である。今回の実験結果に対し、 $T_{1/3} = 2.35$ s の条件でのこの滑動合成波力強度を波高に対し

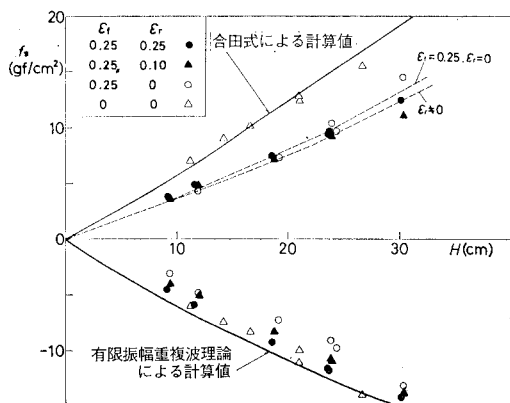


図-7 滑動合成波力強度

ロットしたのが図-7である。図中、実線は同じ高さと同幅の直立壁体に対する計算値で、正の値は合田式、負の値は有限振幅重複波理論によるものである。これらの計算値は $\varepsilon_f = \varepsilon_r = 0$ の不透過型の実験値によく合っている。消波型や透過型の滑動合成波力強度は不透過型より小さい。消波型、透過型の正の強度については後述の設計波力の算定法による計算値も破線で示してあるが、不透過型の61~69%に減じている。これらの減少の程度は負の場合より大きく、消波型や透過型では、滑動安定性も負の波力で決まることがわかる。

4. 設計波力の算定法

これまでの結果をもとに設計波力の算定法を求めた。二重円筒ケーソンに働く波圧および波力強度は図-8に示しているような分布とし、通常の直立壁体に働く合田式による波圧分布を適当に修正する方法による。図の左側にその合田式による波圧分布を示している。波圧強度等には G を下付けして表記しており、 p_{G1} は静水面での波圧強度、 p_{G2} はケーソン下端での波圧強度、 p_{Gu} は底面前端での揚圧力強度、 η_G^* は静水面上波圧が0となる高さである。これらの値は、今回対象としている構造が水平床上にケーソンを直接設置する形式であり、かつ延長方向に直角に波が入射する条件のみを検討したものである。この条件に限れば次のように表される。

$$p_{G1} = \left[0.6 + \frac{1}{2} \left\{ \frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right\}^2 \right] w_0 H \quad (4)$$

$$p_{G2} = p_{Gu} = \frac{p_{G1}}{\cosh(2\pi h/L)} \quad (5)$$

$$\eta_G^* = 1.5H \quad (6)$$

二重円筒ケーソンに働く波圧等はこれに適切な低減係数を乗じることによって与える。図の左側はその垂直断面での分布、右側は透過円筒部および不透過円筒部の水平断面での分布を示している。円筒部に働く波圧分布は、このように、下段の不透過部では前半分に一様分布、上

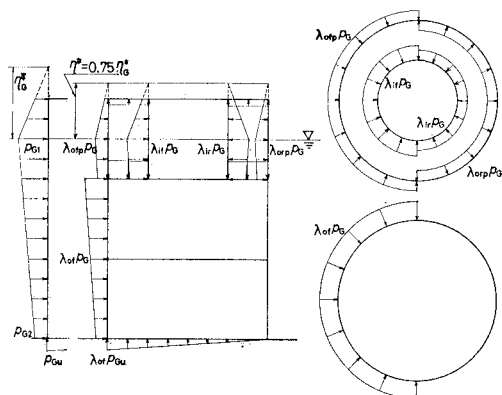


図-8 波の峰のときの設計波力分布一般図

表—1 波力低減係数一覧

波力低減係数	押し波時 I	押し波時 II	
		透過型	消波型
λ_{of}	0.90	0.80	0.80
λ_{ofp}	0.65	0.35	0.30
λ_{orp}	0	0.45	0.80
λ_{if}	0.15	0.60	0.75
λ_{ir}	0	0.60	0.75

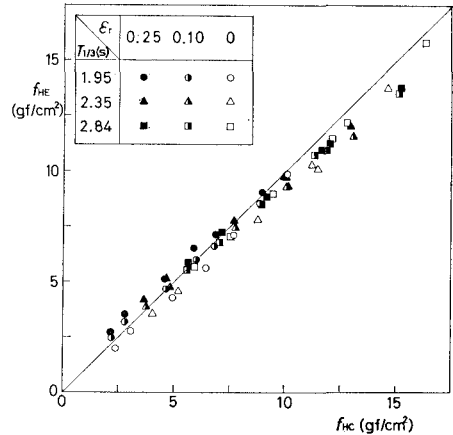
段の透過部では外側と内側円筒のそれぞれ前半分と後半分に違った強度の波圧が一樣に作用するものとする。これらの波圧強度は同じ高さでの合田式による波圧強度 p_G に低減係数 λ を乗じた値であり、各面に垂直に働くとするものである。低減係数 λ にサフィックスを付けているが、 o は外側、 i は内側、 f は前半分、 r は後半分、 p は透過円筒部であることを表す。ただし、透過部の強度は部材の前後の波圧の差、すなわち波力強度で、実質部分にのみ働くものである。また、基部ケーソンには前面壁に λ_{ofp_G} の波圧が、底面前端での強度が $\lambda_{ofp_{Gu}}$ の三角形分布の揚圧力が働くと考え、そのほか、上面の前半分の露出面にもその高さでの波圧強度 λ_{ofp_G} が一樣に下向きに作用するものとする。

波の峰のときで設計において考慮する波力の位相は、前半分の外側に働く波圧が卓越するタイミング（押し波時 I）と、遊水室内部に水が満たされ透過円筒部後半分にも波圧が働くタイミング（押し波時 II）の 2 つを考え、後者については消波型と透過型の違いを考慮する。表—1 はこれらの位相での低減係数をまとめて示したものである。さらに、波の谷のときの波圧を考慮することが重要であるが、これらについては直立壁体に働く第 4 次近似有限振幅重複波理論による波圧分布を準用して与える。

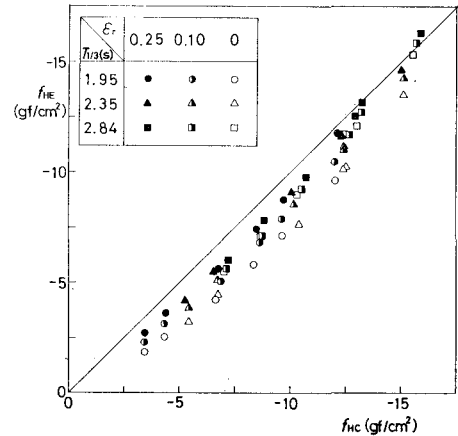
図—9, 10 はケーソン全体に働く水平波力の平均強度について、以上の算定法による計算値 f_{HC} と実験値 f_{HE} の相関図である。 $\epsilon_f=0.25$ で、 $\epsilon_r=0.25, 0.10$ の透過型、および $\epsilon_r=0$ の消波型に対する 1/10 最大値と 1/3 最大値をプロットしたものであるが、提案した波力の算定法がほぼ妥当で、特に図—10 の波の谷のときの波力は実験値の上限値を与えるものであることがわかる。

5. むすび

以上、二重円筒ケーソンの水理特性、特に波力の特性と算定法について述べた。大水深の重複波条件での波力は波の峰のときばかりでなく、谷のときの負の波力も非



図—9 波の峰のときの水平波力強度の計算値と実験値の相関



図—10 波の谷のときの水平波力強度の計算値と実験値の相関

常に重要である。今後、マウンドを有する場合および斜め入射波に対する検討を行う必要がある。なお、本研究は科学技術庁科学技術振興調整費により「海洋構造物による海洋空間等の有効利用に関する研究」の一部として実施したものである。

参考文献

- 1) 谷本勝利・吉本靖俊・岡 幸夫：大水深波浪制御構造物の水理特性と試設計，第32回海岸工学講演会論文集，pp. 515～519, 1985.
- 2) 合田良実・柿崎秀作：有限振幅重複波ならびにその波圧に関する研究，港湾技術研究所報告書，第5巻第10号，57p, 1966.