

二重円筒ケーソンに働く滑動波力に対するマウンドの影響

谷 本 勝 利*・下 迫 健 一 郎**

1. ま え が き

大水深・大波浪海域における防波堤の構造としては、通常の矩形ケーソンよりも台形ケーソン、さらには円筒ケーソンが経済的に有利になる可能性を有している。そのため、著者らは新しい大水深波浪制御構造物として円筒ケーソンに着目し、それに消波機能等を付加した二重円筒ケーソンの開発を進めてきた^{1),2)}。二重円筒ケーソンを海底に直接設置した場合の水理特性や作用波力については前回発表している。本研究はこれに続いて、捨石マウンド上に設置した混成堤形式を対象とした実験を行い、一般的設計波力の算定法を求めることを目的としたものである。

2. 実験の概要

(1) 対象とした構造

二重円筒ケーソンは、四角形あるいは八角形状の底版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とし、不透過な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。透過壁の開口率を変えることにより、反射・伝達率を制御することができる。今回使用した模型は、底版がコンクリート製、それ以外はアクリル製で、外側、内側円筒の外寸直径がそれぞれ 78 cm, 50 cm, 全高が 80 cm, 透過円筒部の高さが 35 cm のものである。実験は、透過円筒部の前半分の開口率 $\varepsilon_f=0.25$, 後半分の開口率 $\varepsilon_r=0.10$ の透過型と、 $\varepsilon_f=0.25$, $\varepsilon_r=0$ の消波型の 2 種について行った。

(2) 実験の方法と実験条件

実験に用いた水路は長さ 105 m, 幅 3.0 m, 深さ 2.5 m の大型造波水路である。当水路は途中から隔壁によって幅 205 cm と幅 80 cm に分割されており、今回は幅 80 cm のほうを用いた。造波機は低慣性直流電動機駆動のピストン型で、入力信号に追従して任意波形の波を造波することができる。水深 h は 100 cm と 130 cm の 2

種で、いずれもマウンド上の水深 d が 58 cm, 天端高 h_c が 16 cm とし、マウンドの厚さを変化させた。実験は波力実験と滑動実験に大別される。波力実験は規則波（有効波数 10 波程度）を用い、3 種の周期についてそれぞれ波高レベルを 5 段階に変化させて行った。模型に波圧計や歪ゲージを取り付け、各点に働く波圧を測定した。図-1 に測点の配置を示す。測点の数は合計 37 であり、一度に測定できないので 3 回に分けて測定した。いくつかの測点については 3 回とも測定し、解析の際にはそのデータを用いてすべての測点におけるデータの位相調整を行い、全水平波力等の合成を行った。

一方、滑動実験は有義波周期 $T_{1/3}$ が 2.63 s の不規則波（有効波数 250 波程度）を用い、水深 100 cm の場

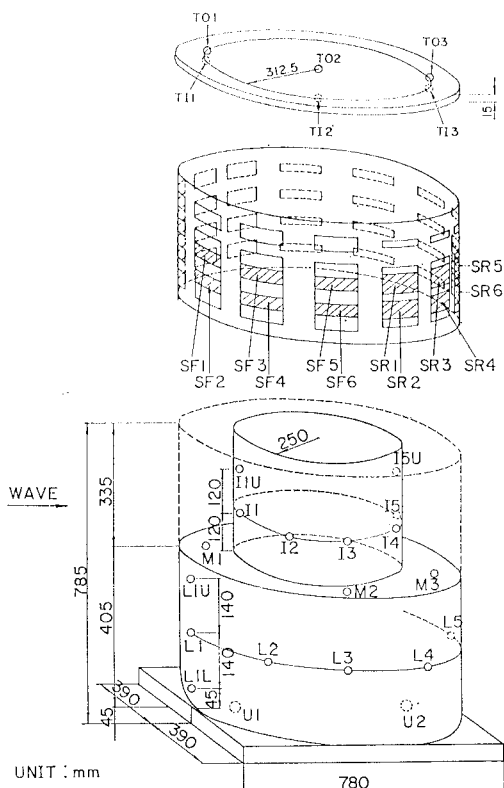


図-1 波圧測点配置図

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 水工部長

** 運輸省港湾技術研究所 水工部 耐波研究室

合についてのみ行った。堤体重量を5種、波高レベルを4段階に変化させ、各波列ごとのケーソンの滑動量を非接触式の超音波滑動測定装置により測定した。同時に代表的な点での波圧も測定した。

3. 波力特性

(1) 波圧記録の例

二重円筒ケーソンを海底面に直接設置した場合の押し波時の作用波力については、合田式による波圧に対して部材ごとに適当な係数をかけ、波圧分布を与える方法を前回提案した。その際に位相として、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つを考えた。図-2は各部に作用する波力を受圧面積で割った波力強度の、時系列データの例を示したものである。なおこの図を含め、波力特性はすべて透過型についてのみ述べる。

ここに

f_{OF} : 透過円筒部前半分の平均波力強度

f_{OR} : 透過円筒部後半分の平均波力強度

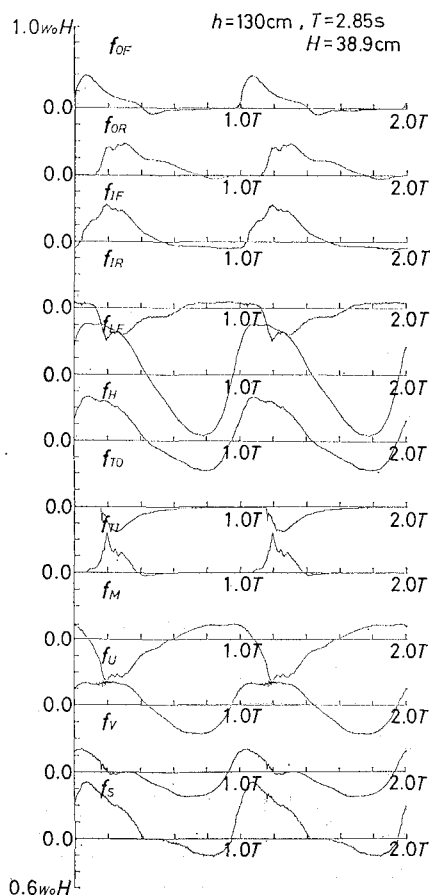


図-2 波力強度の時系列データの例

f_{IF} : 内部円筒前半分の平均波力強度

f_{IR} : 内部円筒後半分の平均波力強度

f_{LF} : 下部円筒前半分の平均波力強度

f_H : 全水平波力強度

f_{TO} : 上床版外側の平均波力強度

f_{TI} : 上床版内側の平均波力強度

f_M : 遊水室下床版の平均波力強度

f_U : 揚圧力強度

f_V : 全鉛直波力強度

f_S : 滑動合成波力強度

であり、水平波力は波の進行方向、鉛直波力は上向きを正としている。滑動合成波力強度は次式で定義される。

$$f_S = (F_H \pm \mu F_V) / (h' + h_0)$$

ここに、 F_H は延長方向単位長さあたりの水平波力、 F_V は同鉛直波力、 μ は摩擦係数(=0.6)で、 $\pm$ は F_H の正負に対応する。波圧がピークとなるタイミングが部材によってずれており、透過部前半分と下部前半分は押し波時Ⅰに、透過部後半分、内部、上床版、下床版は押し波時Ⅱに対応している。ケーソン全体の滑動安定性に影響する滑動合成波力は、各部材ごとのピーク値の和よりも減少し、通常押し波時Ⅰで最大となる。

(2) 水平波力に対するマウンドの影響

二重円筒に働く波力を合田式をもとに求める場合、マウンドの影響を表すパラメータ α_2 を考慮するかどうか問題となる。図-3は下部円筒前半分の平均波力強度のピーク値を示したものである。縦軸は実験値、横軸は直立壁の場合の合田式による計算値で、 $\alpha_2=0$ としている。もしマウンドの影響による波力の増大があれば、波力が大きくなるにつれて実験値が計算値よりも大きくなるはずであるが、計算値と実験値は比例関係にあり、 α_2 の影響は見られない。なお、図中の $\lambda_{OF}=0.9$ の直線は前回の算定法における低減係数をかけた計算値で、今回の実験結果もほぼ一致している。

(3) 透過円筒部に働く水平波力

図-4は透過円筒部の前半分の平均波力強度のピーク値を、図-3と同様に示したものである。実験値と計算

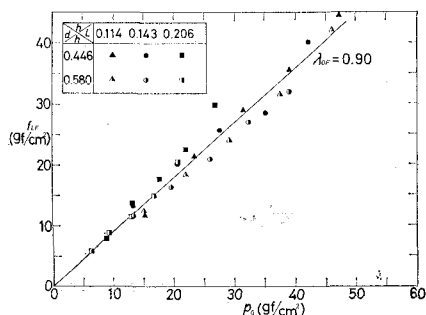


図-3 下部円筒前半分の平均波力強度

値を比較すると、周期の短いほうが相対的に実験値が大きくなっている。これは、スリット部の部材は歪ゲージを用い外側と内側の圧力差を波力として測定しており、動きの激しい短周期の波のほうが圧力差が大きくなるためと思われる。前回の算定法では低減係数 λ_{ORP} を 0.65 と与えているが、これは周期の短いケースの実験値に対応しており、全体としては安全側である。

一方、図-5 は透過円筒部の後半分の平均波力強度のピーク値を示したものである。計算値すなわち波高が大きくなるにつれて、全体的に実験値が頭打ちになる傾向が見られる。これはある程度波高が大きくなると、遊水室に流入する水の量が増えなくなることが原因と考えられる。前回の算定法では低減係数 λ_{ORP} を 0.45 と与えているが、これは全体の実験値の平均的関係に近い。

(4) 内部円筒に働く水平波力

図-6 は内部円筒の前半分および後半分の平均波力強度のピーク値を示したものである。ただし後半分については負のピーク値を示している。かなりばらつきが見られるが、前半分と後半分の値はだいたい同じである。ピークのタイミングは図-1 の時系列データから分かるようにほとんど同じで、押し波時Ⅱに対応している。前回の算定法では低減係数 $\lambda_{IF}, \lambda_{IR}$ をいずれも 0.60 と与えているが、今回の実験結果から見ると、0.80程度が妥当と思われる。

図-7 は滑動合成波力がピーク時の、内部円筒全体の

平均波力強度の値を示したものである。前回の算定法では押し波時Ⅰにおいて $\lambda_{IF}=0.15, \lambda_{IR}=0$ で与えているが、今回の実験値はばらつきはあるものの全体的にやや大きめの値となっている。ただし、この時の波力強度は他の部材にかかる波力強度に比べて小さく、しかも受圧面積も小さいので、滑動合成波力全体にしめる割合はきわめて小さい。なお、内部円筒全体の平均波力がピークとなるタイミングは押し波時Ⅰと押し波時Ⅱの間で、これらの値よりも大きくなる。

(5) 鉛直波力

鉛直波力成分としては、通常のケーソンの場合の揚圧力や上部への打ち込み波力以外に、上床版に対して、遊水室の内側からかかる波力と遊水室下床版にかかる波力がある。図-1 の時系列データから分かるように、上床版にかかる波力は外側と内側でほぼ打ち消しあい、全波力にはほとんど影響しない。遊水室下床版にかかる波力は押し波時Ⅱのタイミングでピークとなり、ケーソンを安定させる方向に働く。揚圧力については、ピークになるタイミングが床版の前側と後側とでややずれるため、押し波時Ⅰから押し波時Ⅱにかけてほぼ一定の値となる。図-8 は全鉛直波力強度のピーク値を示したもので、タイミングとしては押し波時Ⅰに相当する。縦軸は実験値であり、横軸は同じ堤体幅の矩形ケーソンに働く揚圧力強度を合田式から求めたものである。図中の実線は、前回の算定法による押し波時Ⅰの計算値で、上床版

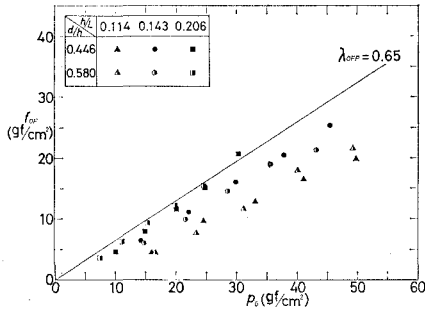


図-4 透過円筒部前半分の平均波力強度

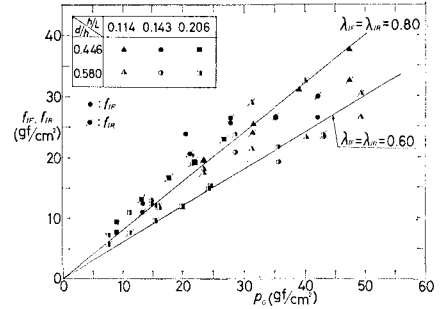


図-6 内部円筒の前半分と後半分の平均波力強度

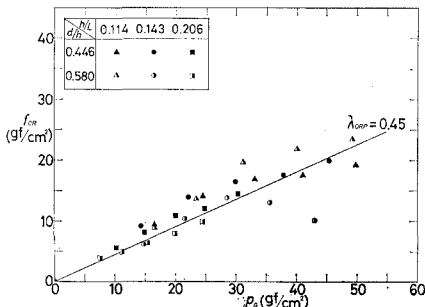


図-5 透過円筒部後半分の平均波力強度

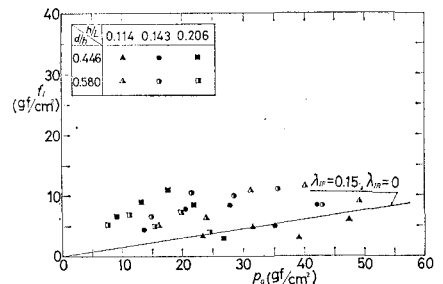


図-7 内部円筒全体の平均波力強度 (f_s ピーク時)

の外側にかかる打ち込み波力は考慮していない。実験結果は多少ばらついてはいるが、平均的に見ると前回の算定式の値よりもやや大きく、合田式による揚圧力の値に近い。これは押し波時 I のタイミングでは、遊水室内への水の流入による効果がありみられないことを表している。

(6) 滑動合成波力

ケーソン全体の滑動安定性を考える場合は、水平波力と鉛直波力の両方を考慮した滑動合成波力について検討する必要がある。図-9 は前回の算定法による滑動合成波力の計算値 ($\alpha_2=0$, 押し波時 I) と実験値 (ピーク値) の相関を示したものである。図中には以前に行ったマウンドのない場合の結果もあわせて示している。計算値は一、二のデータを除いてはほぼ実験値の上限に対応している。なお、この算定法による滑動合成波力の値は、同じ高さ、同じ堤体幅の矩形ケーソンについて合田式で求めた値に比べ約 0.8 倍である。

(7) 不規則波による波圧

今回の波力実験は規則波で行ったが、滑動実験時にいくつかの点で不規則波の波圧も測定している。図-10 は下部円筒前面の測点における規則波と不規則波の波圧の正負のピーク値を、波高との関係で示したもので、負の波圧の計算値は、マウンドのない場合の直立壁に働く波圧を 4 次近似の有限振幅重複波理論で計算した結果である³⁾。規則波と不規則波で多少周期が異なっているが、計算値はほとんど差はない。ところが、正の波圧については規則波では算定式の値とよく一致しているのに対して、不規則波ではやや大きめの値となっている。ただしこれは 1 点だけの値であり、前半分全体の波力強度としては位相差の影響などでほぼ算定式に近い値になると思われる。負の波圧についても同様の傾向が見られ、絶対値としては正の波圧とほぼ同じである。これは引き波時の堤体前面における水位の低下が大きく、特に不規則波の場合に顕著であることを表わしている。

図-11 は遊水室下床版前側の測点における波圧を、図-10 と同様に示したもので、遊水室内の水位変化を表わしていると考えられる。負の波圧の算定式は、遊水室内の水位が $0.25H$ だけ低下するものとして与えている。正の波圧は規則波、不規則波とも計算値よりも大きい。規則波では波高が大きくなると波圧が頭打ちになるのに対して、不規則波ではその傾向はあまり見られない。一方負の波力については規則波と不規則波による違いはなく、波高に関係なくほぼ一定である。したがって遊水室の水位は、周期が同じであれば波高が大きくなっても、ある一定のレベルよりも低下しないものと考えられる。

図-12 は透過円筒部前面の波圧のピーク値を示した

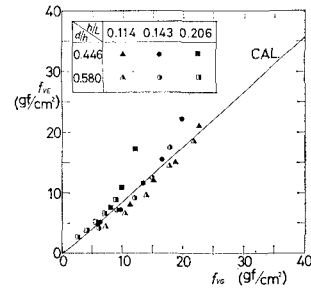


図-8 全鉛直波力強度

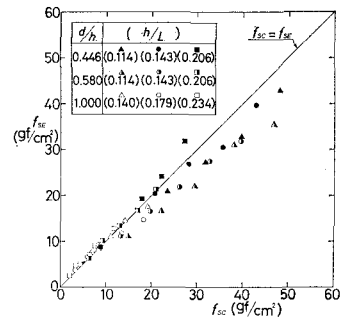


図-9 滑動合成波力強度

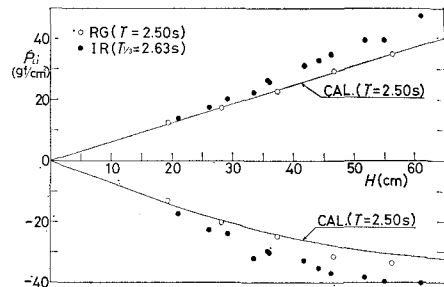


図-10 下部円筒前面の波圧

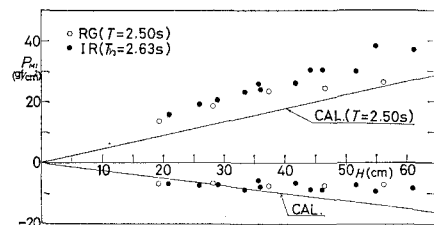


図-11 遊水室下床版の波圧

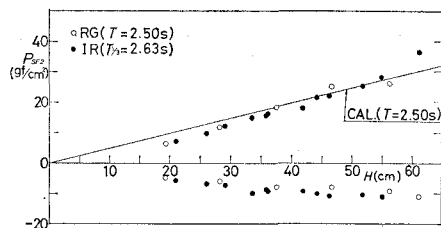
ものである。規則波と不規則波の結果はよく一致しており正の波圧は計算値とも合っている。負の波圧は遊水室から水が流出するときの圧力で、正の波圧に比べると小さく、波高がある程度大きくなると一定の値となる。

4. 滑動特性

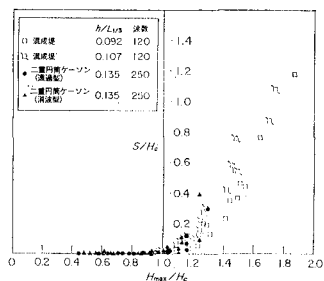
図一13は滑動実験結果を示したもので、多少条件は異なるが通常の混成堤の結果もあわせて示してある。縦軸は滑動量 S 、横軸は最高波高 H_{max} を、混成堤については合田式 (α_2 を考慮) から、二重円筒ケーソンについては前回の算定式 (α_2 を無視) から求めた滑動限界波高 H_0 でいずれも無次元化してある。作用波数が混成堤では 120 波、二重円筒ケーソンでは 250 波と異なるが、いずれも $H_{max}/H_0=1.0$ 前後が滑動限界となっている。このことは混成堤に対する合田式と同様に、マウンド設置型の二重円筒ケーソンに対しても前回の算定法が適用できることを意味している。

5. 結 論

今回の研究において、二重円筒ケーソンをマウンド上に設置した場合、通常の混成堤に見られるようなマウンドの影響による波力の増大は見られないことが明らかになった。また、前回提案した海底設置型を対象とした波力算定法が、マウンド設置型についても適用できることが分かった。ただし、押し波時IIにおける内部円筒に働く波力の低減係数 λ_{IP} , λ_{IR} について 0.60 はでなく 0.80 を用いる必要がある。部材設計においては押し波時Iと押し波時IIの大きいほうを用い、さらに引き波時についても検討しなければならない。なお今回は取り上げなかったが、消波型の波力実験においては、越波をともしような大きい波高の場合、透過円筒部のスリットがすべて波におおわれた瞬間に空気圧縮力と思われる波圧波形が見られた。これについてはさらに検討を進めていくつもりである。その他、上床版のない構造のものも考えられている。波力特性としてはそれほど違いはない



図一12 透過円筒部前面の波圧



図一13 滑動実験結果

と思われるが、越波の挙動等において異なる点もあるので、今後このタイプについても水理実験等による検討を行う必要がある。

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, 1985, pp. 515~519.
- 2) 谷本勝利・下迫健一郎・宮崎啓司: 二重円筒型波浪制御構造物に働く不規則波力, 第34回海岸工学講演会論文集, 1987, pp. 571~575.
- 3) 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, 第5巻第10号, 1966, 57 p.