

ダブル・パラペット型消波堤の開発

田中良弘*・古川圭三**・中村孝明***

1. まえがき

近年、沿岸海域開発構想が具体化するなかで、海岸付近に静穏海域を創造する目的で、沖合に設置する新形式の海域制御構造物の研究がさかんに行われている(小山ら, 1988)。これらの構造物に要求される機能は主として波浪、漂砂等の制御にあるが、水質、環境保全の面からは透過性であることが望ましい。従来より、スリットケーソンをはじめとする各種の遊水式消波堤(谷本ら, 1976)や杭式の透過堤等が提案されているが、それらの多くは、反射率が波周期に依存し、広い周期帯に対してはあまり良好な消波性能を示さなかった。

本研究はこの点に注目し、図-1の概念図に示すように、パラペット形状の透過性曲面壁を2ヶ組み合わせ、さらに堤体前面に遊水部に通ずる開口部を有するダブル・パラペット型消波堤を考案し、この構造の基本的な消波特性および設計に必要な波圧、波力特性を水理実験を通じて明らかにしたものである。また境界要素法を用いた数値計算を行って、実験値との比較検討を行った。

2. 消波特性

2.1 実験方法

消波性能実験は2次元水槽($L50 \times B0.5 \times H1.0$ m)の1/50勾配部分に高さ10 cmの捨石マウンドを設け、その上に縮尺1/40の模型を設置して行った。水深は模型前面で40 cmとし、実験波は実大スケールで周期 $T=5 \sim 14$ 秒、波高 $H=2 \sim 10$ mの18種類である。

対象構造は図-2に示す4タイプである。タイプ1(PS型)はパラペット部を縦スリット、タイプ2(PH型)は円形孔としたものである。またタイプ3(PSI型)はPS型の後部パラペットを不透透とし、タイプ4(PSV型)はPS型の後部を不透透直立壁としたものである。各タイプ共、全堤体幅 B_0 、天端高 h_0 、前面形状 $h_1 \sim h_3$ およびパラペット間隔 B_1, B_2 は一定とした。

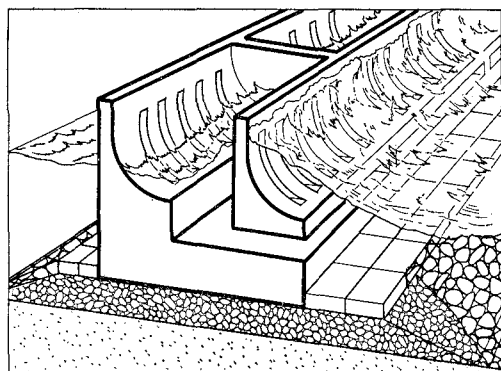
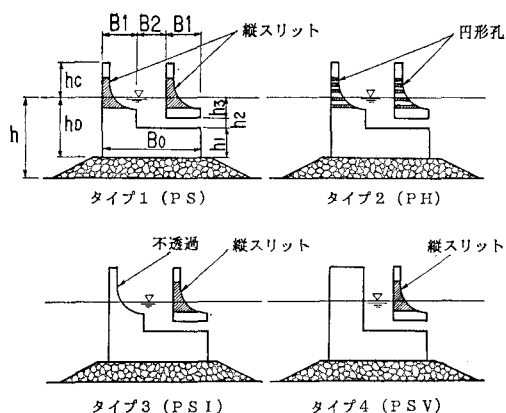


図-1 ダブル・パラペット型消波堤の概念図



構造条件 : $h=40$ cm, $h_D=30$ cm, $h_0=17.5$ cm
 $h_1=15$ cm, $h_2=5$ cm, $h_3=10$ cm
 $B_0=50$ cm, $B_1=17.5$ cm, $B_2=15$ cm
 (縮尺1/40)

図-2 模型タイプ

2.2 実験結果

(1) 反射率

図-3にタイプ1~4の波高5 cmに対する反射率 K_R を示す。横軸は遊水部幅 B と波長 L の比をとった。遊水部幅 B は各タイプ毎に異なり、それぞれ図中に示した。

PS, PH, PSIの反射率は大差なく、全周期帯で0.4以

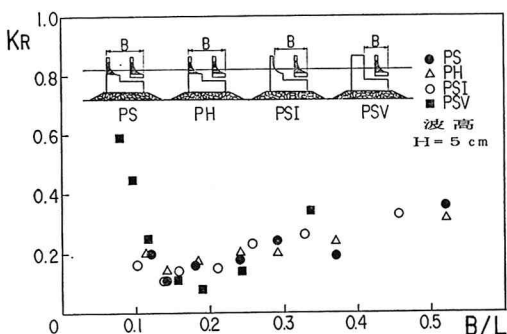
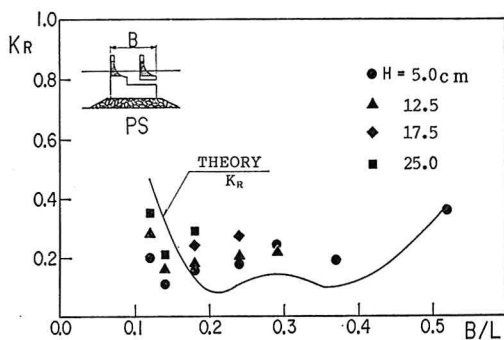
* 正会員 Ph.D. 大成建設(株)技術開発部

** 正会員 工修 大成建設(株)技術開発部

*** 正会員 (株)アイエヌジー

下の低い値を示しており、長周期側で0.2以下と非常に低い値を示す。特にPSとPSIの反射率に違いが見られないのが興味深い。またPSVとPSIを比較すると、PSVは周期依存性を示し特に長周期側で大きな反射率を示すが、PSIは周期により顕著なピークを示さない。このことから、後部パラペットの曲面形状が反射率低減に寄与していると考えられる。また、従来のスリットケーソンの実験結果(谷本ら, 1976)は、PSVの反射率に比べ、さらに顕著な周期依存性を示している。これより、前部パラペットの曲面形状及び前面の開口部が反射特性向上の重要な要素と考えられる。

また、図-4にPSの4種類の波高に対する K_R を示す。波高による反射率の違いは顕著で、波高が大きくなるほど K_R は大きくなる傾向にあり、波高に対して非線形性を示す。

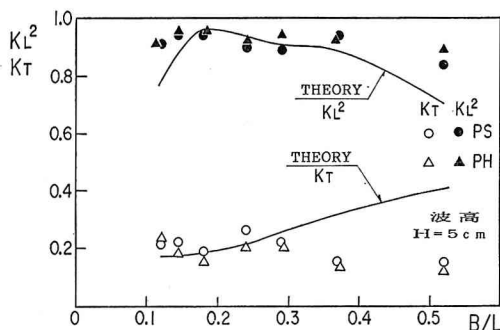
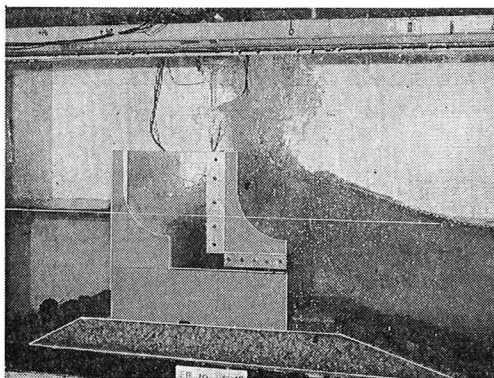

 図-3 各タイプの反射率 K_R の比較

 図-4 波高による反射率 K_R への影響 (PSタイプ)

(2) 透過率およびエネルギー損失率

図-5にPS, PH型の波高5 cmに対する透過率 K_T とエネルギー損失率 $KL^2 (= 1 - K_R^2 - K_T^2)$ を示す。両タイプとも K_T は周期が長くなる程大きくなる傾向にあるが、全体的に低く0.3以下の値を示す。またPH型の方が若干小さい。 KL^2 は両タイプとも全周期帯で0.8以上を示し、既存の直立消波構造物に比べ、非常に高いエネルギー損失特性を持つ。なお、波高に対する K_T の変

化は K_R の場合ほど顕著ではなかった。

写真-1に波の作用状況の例(実大 $T=10$ sec, $H=10$ m, PH型)を示す。


 図-5 透過率 K_T およびエネルギー損失率 KL^2

 写真-1 実験状況 ($T=10$ sec, $H=10$ m, PH型)

3. 波力特性

3.1 実験方法

全体波力については、図-6に示すように、2次元水槽に高さ40 cmの水平床を設け、その上にマウンドなしで縮尺1/20の模型を設置して堤体に作用する水平波力 F_H 、揚圧力 F_V を測定した。 F_H 、 F_V は防水型の3分力計を水平床内にセットして測定した。全体波力実験に用いた模型はパラペットを円形孔とし、天端高さは消波実験に用いた模型に比べ若干低くした。対象波は実大スケールで周期 $T=4\sim 14$ sec, 波高 $H=2\sim 6$ mの15種類である。

部材波圧については消波性能実験と同時にを行ったため対象構造、対象波浪とも消波実験に準ずる。波圧測定は図-7に示すように、パラペット前面、開口部および下部ケーソン前面に波圧計を計10点、またケーソン底面に間隙水圧計を3点取り付け測定を行った。

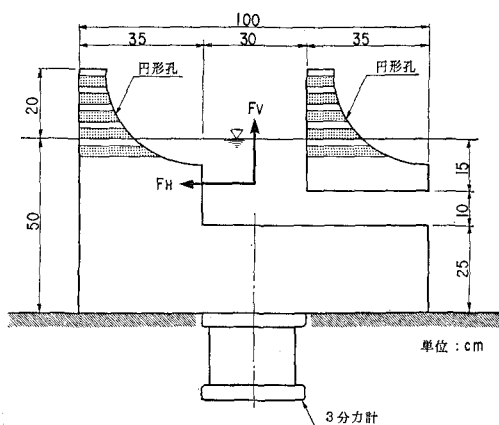
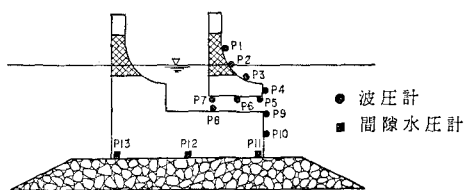
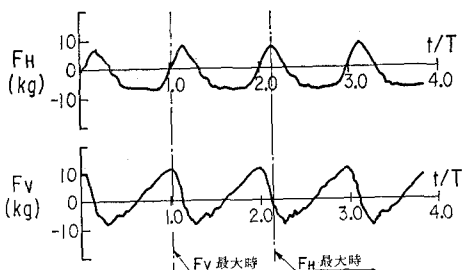
図-6 全体波力実験用模型 ($S=1/20$)

図-7 波圧実験センサー取付位置図

図-8 水平波力 F_H 、揚圧力 F_V の測定例
($T=10$ sec, $H=6$ m)

3.2 実験結果

(1) 全体波力特性

図-8 に水平波力 F_H 、揚圧力 F_V の実測波形の例を示す。この波形によれば、堤体に働く F_H と F_V の間には位相差が生じる。(約 40°) すなわち F_H 最大時には F_V はほぼゼロとなり、 F_V 最大時には F_H は最大時の約 30% 以下となる。図-8 は $H=6$ m, $T=10$ sec の例だが、他の周期の波でも同様の傾向が認められ、その位相差は $40 \sim 70^\circ$ であった。

また、図-9 は F_H 、 F_V の値と合田式により計算した波力との比を示したものである。合田式の値は、同じ天端高さの直立壁にかかる波力として求めた。図-9 によれば、その比率は周期によりばらついているが、およそ以下の通りとなった。

水平波力 F_H : 45~75%

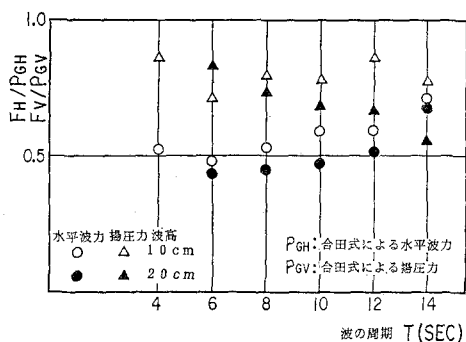


図-9 全体波力 (合田式との比率)

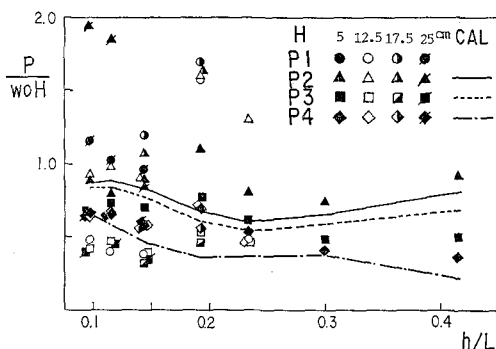


図-10 パラペット前面波圧分布

揚圧力 F_V : 55~85%

以上の結果より、本構造物の設計においては、堤体安定重量の低減など設計上のメリットが考えられる。

(2) 部材波圧特性

図-10 にパラペット前面波圧 $P_1 \sim P_4$ についての実験結果を示す。縦軸は無次元平均波圧強度 $P/w_0 H$ 、横軸は水深と波長の比をとった。波面の壁面への衝突による波圧であるため、測定値は大きくばらついているが、全般的に P_1 , P_2 で衝撃波圧が作用し、 P_3 , P_4 で重複波圧となっている。衝撃波圧の最大値は $P/w_0 H \approx 2$ であり、既往の研究(高橋, 1983)による直立壁に作用する波圧 ($P/w_0 H \approx 2 \sim 6$) に比べ、相当小さい値となっている。これは、今回対象とした波が、前面で碎波する波でなかったことにもよるが、パラペットの曲線形状によって、波が上方へ這い上がることで、波圧強度を低減できると考えられる。波高による違いはこの図からは明確ではないが、 P_1 , P_2 については波高が大きい程、波圧も大きくなる傾向にあり、 P_3 , P_4 については波高に対して比較的線形関係にある。

4. 滑動安定性

4.1 実験方法

滑動実験は消波実験と同じ水槽で行い、水深、マウン

ド形状とも同一とした。対象構造は図-2のPS型のみとし、実験波は実大スケールで $T=12\text{ sec}$, $H=7$ および 10 m の2波とし、いずれも前面で碎波しない波である。計測項目は堤体水中重量と堤体の水平滑動量であり、堤体重量は、模型の下部ケーソン内に重量が既知の重りを入れて調整し、滑動量は水槽のサイドからビデオトラッカーを用いて精密に測定した。

滑動実験に先立ち、捨石マウンドと堤体の静止摩擦係数を測定した。堤体重量を6種類変化させ、水平载荷を行い、堤体が滑り出す直前の水平力を測定し最小自乗法で計算した結果、静止摩擦係数はおよそ0.6であった。

4.2 実験結果

図-11に堤体水中重量と滑動量の関係を示す。縦軸は1波目から6波目までの、1波当りの平均滑動量をプロットしたものである。図中の曲線は実験値の平均的な傾向を表すものである。実験値は堤体重量の小さいケースでかなりばらついているが、これは堤体に波が繰り返し作用するにつれ、砕石の噛み合せが増したり、堤体後趾が砕石内に沈下することによる抵抗の増加等がその原因と考えられる。実験より得られた堤体の滑動限界重量は、 $H=7\text{ m}$ のケースで約 100 kg/m (実大 150 t/m)、 $H=10\text{ m}$ のケースで 155 kg/m (実大 248 t/m) であった。

この結果により、全体波力特性の項で述べた設計上のメリットが確認された。つまり、通常的设计法によれば、 $H=10\text{ m}$ の場合必要堤体水中重量は約 400 t/m となるが、滑動実験結果では約 248 t/m となったことにより、約35%の重量低減が可能となる。ただし、波力成分の組み合わせに関しては、今回の実験以外の条件も考慮して検討する必要がある。

5. 理論解析

5.1 解析方法

理論解析は、透過性壁体内やマウンド内の流体運動を考慮した線形ポテンシャルの境界値問題として定式化

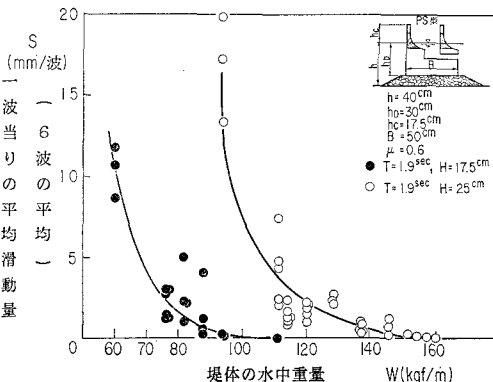


図-11 堤体の水中重量と滑動量の関係

し、これを2次元グリーン関数を用いた積分方程式に適用して数値的に解いた。解析領域は図-12に示すように6領域とし、パラベットの透過部分とマウンド部分は井島(1980)、奥園(1983)にならい、流体の速度と加速度に比例する抵抗を受けるものとした。マウンドと外部領域I、IVとの境界 S_a では、流速と圧力の連続を接続条件とした。

パラベット透過部の境界 S_p では、図-13のように、流体が空隙内を流動し、速度と加速度に比例する抵抗を受けるものとする。速度に比例する抵抗係数を μ_1 、加速度に比例する抵抗係数を μ_2 とすると、運動方程式は空隙内流速を U として、次式で表わされる。

$$\frac{dU}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - \mu_1 U - \mu_2 \frac{dU}{dt} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、速度ポテンシャルを Φ とし、圧力は孔内で直線的に変化すると仮定し、Bernoulli の式を用いると(1)式は次のように変形される。

$$\frac{1}{l} \frac{\partial}{\partial t} (\phi_1 - \phi_2) = -\frac{\mu_1}{\cos \theta_1} \frac{\partial \phi_1}{\partial \nu} - \frac{1 + \mu_2}{\cos \theta_1} \frac{\partial}{\partial \nu} \frac{\partial \phi_1}{\partial t} \quad \dots\dots\dots(2)$$

波浪域で運動は定常的な調和運動をするものとし、時間変動項を消去すると、(2)式は次のように書き直される。

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial \nu} = (\phi_1 - \phi_2) \frac{\cos \theta_1}{l} \frac{1}{1 + \mu_2 - i/\sigma \mu_1} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 $\Phi = \phi \cdot e^{i\sigma t}$, $i = \sqrt{-1}$, $\sigma = 2\pi/T$

T : 波の周期, ν : 各境界の法線方向

(3) 式で領域I側の S_p での境界条件が得られたが、他の S_p での境界条件も同様にして得られる。

抵抗係数 μ_1 , μ_2 は長波近似理論による奥園(1983)の研究により、堤体幅と波長および空隙率の関数として与えられる。領域IIについては、今回の計算では、パラベットと同様の抵抗を受けるものとした。

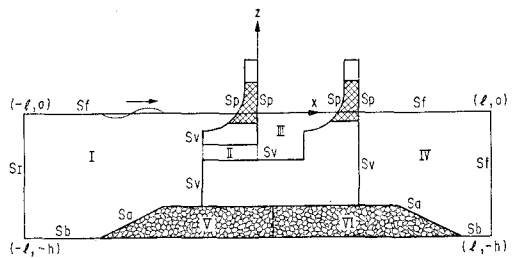


図-12 解析領域および座標系

5.2 解析結果

理論解析は図-2のタイプ1, 3, 4に対して、それぞれ K_R , K_T , 波圧分布を求めた。

PS型の K_R は図-4に示すように実験値をよく再現

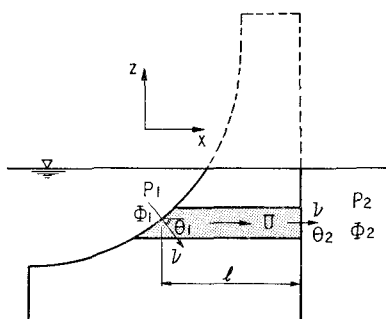


図-13 パラペット部における境界条件

している。 K_T は図-5に示すように、実験値より若干大きくなっているが、これは砕波や渦によるエネルギー損失を数値計算では表現できないためと考えられる。

図-14は3タイプの K_R を比較したものであるが、実験結果とは傾向は一致しているものの、どのケースも周期依存性がある。これは、領域Ⅱでは本来流速の2乗に比例する抵抗が働くと考えられるが、今回は流速に比例する抵抗を考えたため、特に長周期波でその差が出たものと考えられる。PSIとPSVの計算結果により、後部パラペットの曲面形状が、特に長周期波に対する反射率低下に寄与していることがわかる。

部材波圧は $P_2 \sim P_4$ を図-10に示すが、 $H=5\text{ cm}$ の

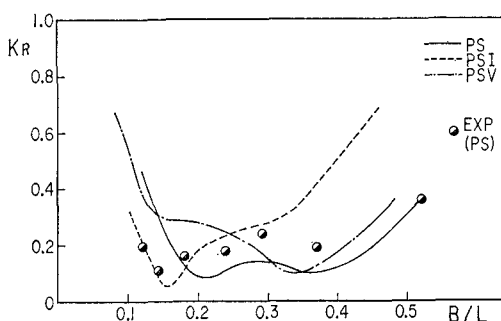
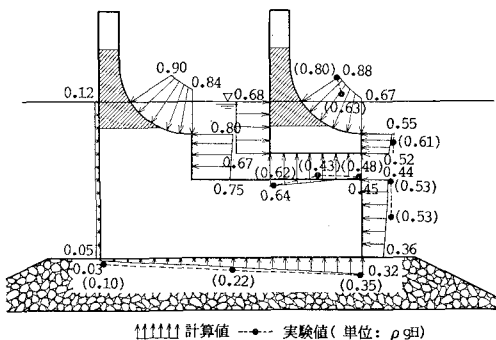


図-14 理論解析による反射率の比較

図-15 計算値と実験値の波圧分布の比較
($T=12\text{ sec}$, $H=2\text{ m}$)

実験値と比較的一致している。また実大スケールで $T=12\text{ sec}$, $H=2\text{ m}$ の場合の全体波圧を図-15に示すが、 P_3 を除いて、実験値とよく一致している。

6. 結論と今後の課題

ダブルパラペット型消波堤の基本的な水理特性を模型実験と数値計算を通じて検討し、以下の特性がわかった。

(1) 消波特性

本構造は従来の遊水部を有するスリットタイプの消波堤では得られないような広い周期帯に対し低い反射特性を示す。パラペットの曲面形状と前面の開口部が反射率低下に寄与しているものと考えられる。

(2) 全体波力特性

構造物全体に作用する波力は、水平波力最大時と揚圧力最大時で位相差が生じ、堤体安定重量の低減など設計上のメリットが生ずる。また波力値は、直立壁に対する合田式の値に比較して、水平波力は約25%、揚圧力は約15%の低減が考えられる。

(3) 部材波圧特性

パラペット前面には衝撃波圧が作用するが、その値は従来の混成堤の直立部に作用する波圧に比べ、かなり小さくなる。

(4) 理論解析

線形解析モデルによる反射率、透過率、全体波力、部材波圧などの計算値と実験値との比較により、非砕波で小さい波高に対して、解析モデルの妥当性がある程度検証できた。しかし入射波高が大きい場合、消波特性や波圧分布の再現性が悪く、有限振幅波による非線形解析の必要性がある。また水理実験によれば、開口部での流速が非常に速く、渦の発生が認められ、エネルギー損失に寄与していると考えられるので、この現象の解明と、解析モデルへの適用が今後必要と考える。

謝辞：本実験の一部は中央大学理工学部で2次元水槽を使用させて頂いた。また、有益な御助言を載せた中央大学理工学部・服部教授、水口助教授ならびに技術員・渡部氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 小山文男, 他 (1988): 斜板を有する新型潜堤(SURF)の開発, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 512~516.
- 谷本勝利, 他 (1976): 各種ケーソン式混成堤の反射・越波および波力特性に関する模型実験, 港研資料, No. 246.
- 高橋重雄, 他 (1983): 直立壁に作用する衝撃波圧の発生機構に関する一考察, 港研報告, 第22巻第4号.
- 井島武士, 他 (1980): 任意断面形の空隙浮体の2次元運動と波の変形, 土木学会論文集第296号, pp. 25~33.
- 奥園英明 (1983): 遊水部をもつ有孔壁岸壁の消波特性に関する研究, 九州大学学位論文.