

ダブル・パラペット消波堤の消波・波力特性について

田中良弘*・酒井雅史**・木暮 睦***

1. はじめに

ウォーターフロント開発構想が次々と具体化する昨今、沿岸域に静穏な海域を創出し、高度利用を行うとともに、周辺海域への景観の配慮、あるいは親水空間確保の要請が増大している。このため、新形式の海域制御構造物では、波浪、漂砂等の制御の他、海水浄化をはじめ環境保全の面からも形状や機能が検討されている。波浪制御の面からみると、従来より提案されている各種の透過式消波堤の多くは、消波効果が波の周期に依存し、広い周期帯ではそれほど良好な効果を示していない。著者らは、前回、ダブル・パラペット型消波堤について基礎水理実験を行い、広い周期にわたり消波効果が期待できる等の基本特性の把握を行った。

本研究の目的は、パラペットの形状、スリットの有無開口部の有無等により、消波特性、及び水平波力と揚圧力の位相差を考慮した波力特性に与える要因を明確にして、設計に必要な基礎データを得ようとするものである。そのため、堤体形状を系統的に変化させ、碎波・非碎波、規則波・不規則波などの波浪条件の下で2次元水理実験を実施した。さらに、堤体の形状や波浪条件に応じて、境界要素法を用いた線形理論解析を行い、実験値との比較検討を行うことで消波メカニズムを解明しようと試みた。

2. 消波特性

2.1 実験方法

消波実験は2次元水槽（L47×B0.5×D1.6m）を用い、勾配 1/50 の水路床部に高さ 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（実大 16 m）とし、実験波は規則波と不規則波を用いている。規則波は、碎波も含めて現地換算で周期 $T=5\sim14$ 秒、波高 $H=2\sim10$ m の 15～21 種類を対象波とした。また不規則波は周期 $T_{1/3}=7.7\sim10.9$ 秒、波高 $H_{1/3}=4\sim8$ m の 3 種類のプレッ

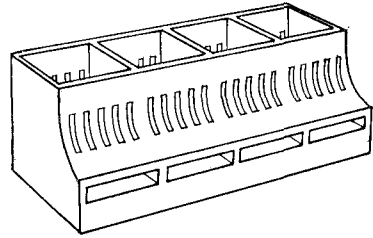


図-1 ダブル・パラペット消波堤概念図

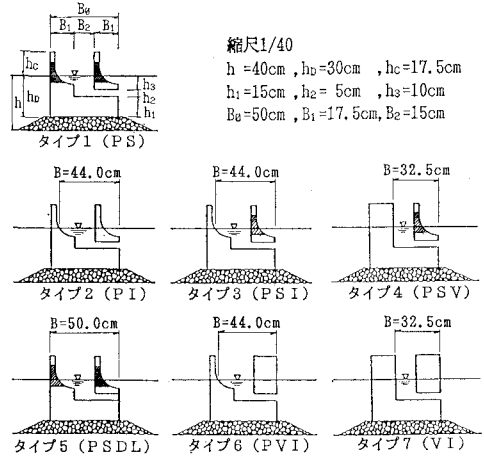


図-2 実験模型（7タイプ）

ドシュナイダー型のスペクトルを用いた。

対象構造は、図-2 に示すようにパラペットの形状を変化させたタイプである。タイプ1（PS型）はパラペット部を縦スリットとした基本型、タイプ2（PI型）はパラペットを不透過としたものである。タイプ3（PSI型）はPS型の後部パラペットを不透過とし、タイプ4（PSV型）はPS型の後部を不透過直立壁としたものである。またタイプ5はPS型の開口部を塞いだもので、タイプ6はPI型の前面を不透過直立壁としたもの、タイプ7はPSV型の前面を不透過直立壁としたものである。各タイプとも全堤体幅 B_0 、天端高 h_0 、前面形状 $h_1\sim h_3$ 、パラペット間隔 B_1 , B_2 は一定とした。

* 正会員 Ph.D. (株)篠塚研究所 主席研究員

** 正会員 工修 大成建設(株) 技術開発部 海洋開発室主任

*** 工修 大成建設(株) 技術開発部 海洋開発室係員

また、タイプ別に遊水長 B を定義した。

2.2 実験結果

(1) 反射率

図-3 にタイプ1の規則波・不規則波に対する反射率を示す。横軸は遊水長 B と波長 L の比をとった。規則波では各周期に対して高い消波効果を示している。不規則波ではどの波も同様の傾向を示し、長周期波で反射率が最も小さくなる。図-4 はタイプ1～7の規則波の波高 5 cm に対する反射率を示す。パラペット壁を有するタイプ1～4では、タイプ1と3が最も反射率が小さい。タイプ4は短周期では、タイプ1あるいは3と類似した値を示すが、長周期では反射率が大きくなってしまふ。タイプ2はこれらの中では反射率が最も大きい。

堤体形状の消波特性に与える要因について各要素毎に比較を行った。スリットの効果(タイプ1と2の比較)では、タイプ2はタイプ1の約2倍程度の値をしめしている。しかし、タイプ1と3を比較した場合は、反射率にそれほど大きな差はみられない。全周期帯にわたってほぼ同様の値を示す。以上より、スリットの効果、特に、前面のスリットの有無が反射率に大きな影響を与えると考えられる。開口部の効果(タイプ1と5の比較)については、短周期ではほぼ等しい反射率を示すが、長周期になるとタイプ1の方が反射率が小さい。すなわち、長周期側では、開口部の有無による消波効果の違いが顕著である。物理的には堤体前面での渦流の発生等が消波に大きく影響しているといえる。パラペットの形状による消波効果の違いでは、前面壁が曲面と直立(タイプ2と6)を比較すると、曲面壁は直立壁の2/3ほどの反射率を示し、特に短周期でその差が顕著である。遊水長の違いによる消波効果は、透過型の場合、短周期ではそれほど変化はなく、長周期になるとともに遊水長が長い方が顕著で小さな反射率を示す。

以上より、堤体形状による消波効果の違いは顕著に表れており、特に短周期の場合は堤体の前面形状の違い、長周期の場合には、開口部の有無による消波効果への影響が大きいと考えられる。

(2) 透過率, エネルギー損失率

図-5 にタイプ1の各波高での透過率及びエネルギー損失率、図-6 にタイプ1～7の実験値を示す。透過率は長周期になるほど、また波高が大きくなるほど小さくなる。タイプ1と5の透過率はほぼ一致していることから、開口部の有無は透過率にはあまり関係ないといえる。エネルギー損失率は、不透過型が多いため、反射率の大小に左右されるが、堤体前面が曲面壁の場合には0.8以上で、特にタイプ3と4ではほぼ全周期にわたり、0.9以上の値を示す。

(3) 開口部内の流速

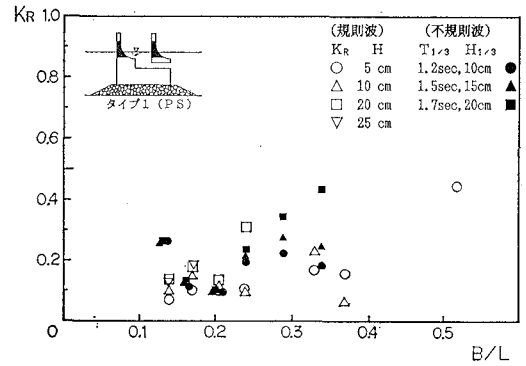


図-3 規則波・不規則波の反射率 (タイプ1)

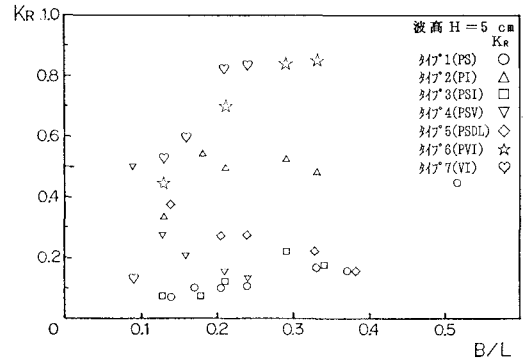


図-4 各タイプの反射率 (規則波)

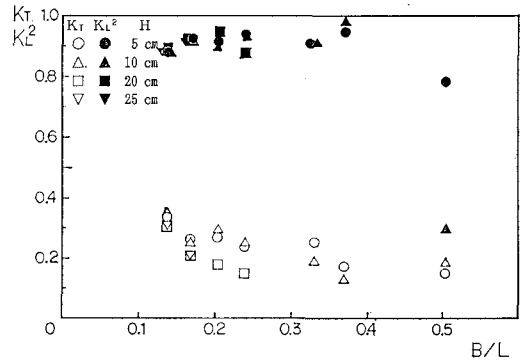


図-5 透過率及びエネルギー損失率 (タイプ1)

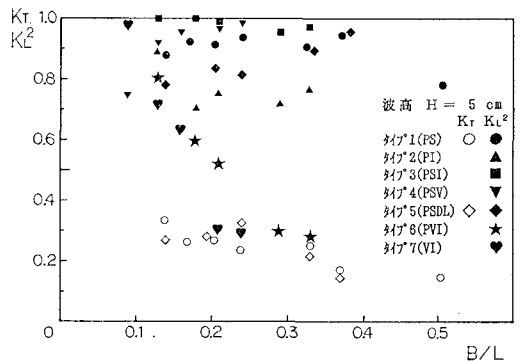


図-6 各タイプの透過率及びエネルギー損失率

開口部内の流速は各タイプとも堤体内への流入流速と流出流速がほぼ等しいか、または流出流速の方が大きな値を示している。長周期になるほど、波高が大きくなるほど流速は大きくなる。タイプ別では、不透過で直立壁を持つタイプ7の流出流速が大きい。透過型で遊水長が大きいほど遊水部内での水位変動が小さくなるため、流出流速が小さくなる。実験では、開口部の前後での渦の発生により、エネルギーが大きく損失すると考えられる。

3. 波力特性

3.1 実験方法

全体波力は、消波実験と同様の条件で、図-7 に示すようにマウンド内に三分力計を設置し、その上に模型を載せて堤体に作用する水平波力 F_H 、揚圧力 F_V を測定した。規則波は現地換算で、砕波を含めた周期 $T=8\sim 14$ 秒、波高 $H=4\sim 14.4$ m の30種類である。不規則波は、消波実験と同様のものを用いた。対象構造は、消波実験の測定ケースのタイプ1～3とタイプ5とした。

また、部材波圧は、前後パラベットと下部構造体の底面に波圧計を取り付け、波力実験と同時に測定を行った。

3.2 実験結果

(1) 全体波力特性

図-8 に水平波力 F_H と揚圧力 F_V の測定波形を示す。堤体に作用する力には位相差が生じるため、最大水平力と最大揚圧力の発生時期に着目して、堤体の安定設計に反映できるような特性値 F_H^V 、 F_V^H 、 $T_H^{\max}$ 及び $T_V^{\max}$ を定義して位相特性を明確にした。また、合田式による波力算定値と実験による測定波力との比率（波力低減率） λ を考慮し、タイプ別の波力特性の把握を行った。

(a) 最大波力の位相差特性

図-9 および図-10 にタイプ1の各波高の最大揚圧力作用時の水平力 F_H^V と最大水平力作用時の揚圧力 F_V^H を示す。横軸は遊水長と波長の比をとっている。 F_H^V では波高による違いはそれほど小さくなく、各周期ではほぼ同様の値を示している。 F_V^H は長周期になるにつれて徐々に小さくなり、揚圧力が押し込み方向に作用している。

また、タイプ別では、タイプ5以外はどのタイプも波高によらず、ほぼ同様の F_H^V を示し、タイプ5では若干大きい値となった。 F_V^H はタイプ3では1と同様の傾向がみられ、揚圧力が押し込み方向に作用している。最大水平力の出現時刻 $T_H^{\max}$ は、各タイプとも波長が短く、波高が大きくなるほど遅くなり、逆に、最大揚圧力の出現時刻 $T_V^{\max}$ は波長が短いほど早くなる傾向が認められる。すなわち、波長が短く、波高が大きくなる

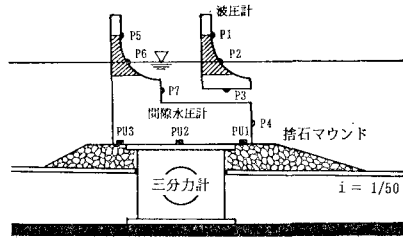


図-7 波力実験模型設置状況及び波圧計取付け位置

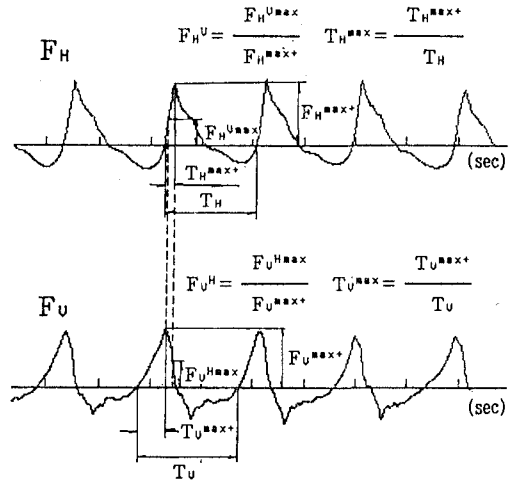


図-8 測定波形と特性値の定義

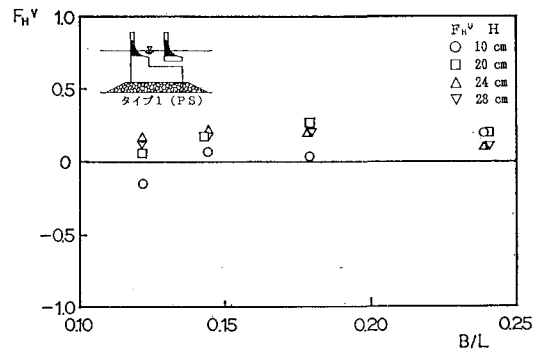


図-9 最大揚圧力作用時の無次元化水平力

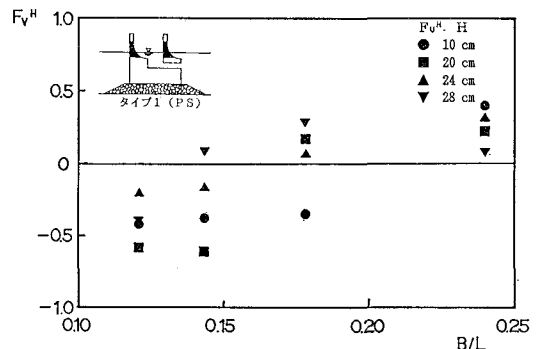


図-10 最大水平力作用時の無次元化揚圧力

ほど、位相差が小さくなるといえる。これらの結果より、波力の位相差特性は、タイプ1と3に対して上限値として、最大揚圧力が生ずる時には、水平波力は最大時の30%、最大水平力が生ずる時には、揚圧力は最大時の40%が同時に作用するとみなすことができ、この結果を考慮して設計を行うことが可能となる。

(b) 波力低減率

図-11 にタイプ1の各波高の水平波力と揚圧力の合田式に対する波力低減率と波周期の関係を示す。波高によりバラついているが、どの周期でも波力低減率 $\lambda = 0.6 \sim 0.9$ の値を示す。また、図-12 には波高 20 cm の場合の各タイプの合田式に対する波力低減率を示す。各タイプの水平波力の低減率は、同一周期ではタイプによりバラつきがあるものの、 $0.4 \sim 0.9$ の値を示す。不規則波の場合には、各タイプの水平波力および揚圧力の低減率ともに、規則波と比較して小さくなるという結果が得られた。これらの結果より、実用面からタイプ1と3への適用を考慮すると、水平波力の合田式に対する低減率を90%、揚圧力は85%として波力算定を行うことができる。したがって、波力の位相差と波力の低減率を考慮することで堤体の安定重量の低減を期待できるなど設計を有利に行えることが確認できた。

(2) 部材波圧特性

部材波圧は波圧の振幅と入射波高の比をとった無次元化平均波圧強度で算出している。前部パラベットの前面波圧は衝撃波圧が作用するためバラつきが大きくなっている。衝撃波圧の最大値は、前面で砕波した場合も含めて $P/w_0 H_{1/3}$ であり、砕波を含まなかった昨年の実験結果よりも大きな値となっている。開口部内の水圧は、各タイプとも同一波高では、周期の増加に伴い、大きくなる傾向にある。これは周期が大きいくほど、遊水部内水位の変動が大きくなるためと考えられる。タイプ別ではタイプ5が最も大きく、他のタイプはほぼ同様の値を示している。タイプ5は、開口部前面を塞いでいるものの、遊水部側から開口部内に水の変動が伝わり、その閉鎖された領域内で移動を行うため、内圧が高まると予想される。測定波形は、開口部の出入口で発生する渦の影響によりかなり不規則な波形を示している。下部構造体前面の波圧は、各タイプとも波高の変化に対して、それほど顕著な波圧強度の変化はみられない。また、同一波高では周期の増加とともに前面波圧が増加する傾向にある。後部パラベットに作用する波圧の挙動は、前部パラベットと下部構造体のものと類似しているが、透過型では波高が大きくなると、前部パラベット波圧の約 $1/3 \sim 1/2$ の値を示す。下部構造体の底面に作用する揚圧力は、ほぼ直線的な分布となっており、中間部では前部の50~60%、後部では前部の30%前後の値を示している。

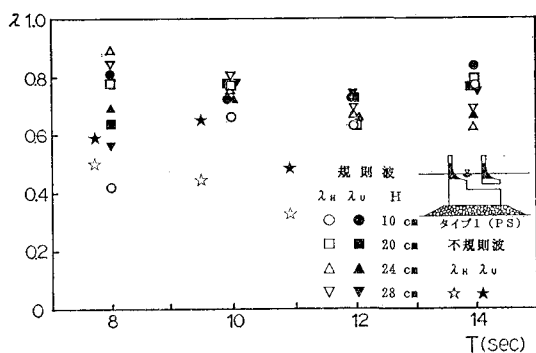


図-11 水平波力と揚圧力の低減率 (タイプ1)

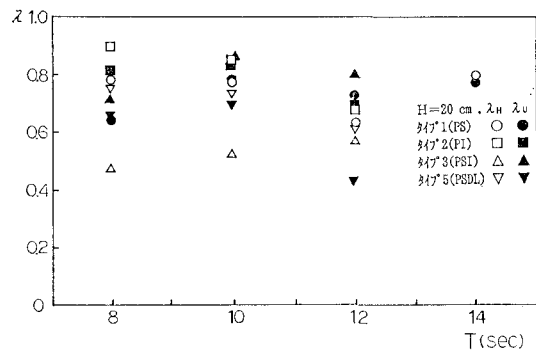


図-12 各タイプの水平波力と揚圧力の低減率

また、底面の各測定点での最大値はほぼ同時に出現する。

4. 理論解析

4.1 パラベット形状の影響

理論解析は図-13の領域について、ダブル・パラベット消波堤のパラベットとマウンド内の流体運動を考慮した線形境界値問題を境界要素法により数値解析を行った。

理論解析は図-2のタイプ1および3~5について、開口部の抵抗がないものとして計算した。図-14は各タイプの反射率の計算結果を示している。計算値はどのタイプも短周期と長周期側で大きくなる傾向を示してお

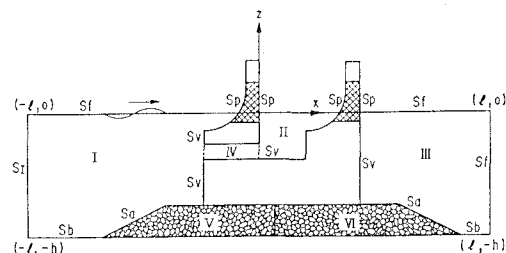


図-13 理論解析領域および座標系

り、周期特性が認められる。また、タイプ1や5のような透過型の場合の反射率が全般的に小さく、タイプ1と3では反射率の大きさは異なるが、その変化傾向は非常に類似している。タイプ4と他のタイプの比較より、長周期では後部パラベットの曲面形状の影響により反射率が低減されているといえる。実験値との比較では、開口部の影響がないタイプ5で全周期にわたり良く一致しているものの、他のタイプでは実験値との差が生じている。図-15に各タイプの透過率とエネルギー損失率の計算値と実験値を示す。透過率はタイプ1では実験値より大きな値を示しており、タイプ5では長周期で比較的一致している。また、エネルギー損失率は、実験値よりも全般的に小さな値を示している。開口部の流速実測値と理論値を比較しても、理論値の方が開口部の抵抗を考慮していないため、大きめの値となっている。これらの結果より、各タイプの堤体前面での碎波や開口部での渦の発生によるエネルギー損失を計算上で再現するのは困難ではあるが、開口部に作用する抵抗を考える場合、流速の2乗に比例した非線形項を考慮する必要があると考

えられる。

5. 結 論

ダブル・パラベット消波堤の消波および波力について、模型実験と理論解析から次の特性が明らかとなった。

(1) 堤体形状の消波特性に与える要因

a) 前面パラベットのスリットの有無が反射率の低減に大きく寄与する。

b) 開口部の有無は、消波効果に大きな影響を与え、特に長周期波で効果が著しい。これは開口部内の流速が増大し、堤体前面での渦流の発生が消波に大きく寄与している。

c) パラベットの曲面形状による消波効果は短周期において著しい。

d) 堤体が透過型の場合の消波効果は、遊水長が長いほど長周期波に対して有効である。

e) 短周期では、後部壁の形状や透過性の違いによる消波効果への寄与が小さい。

(2) 波力特性

a) 水平波力と揚圧力に位相差が生じる。揚圧力最大時の水平波力は、波高によらずほぼ様な値を示し、上限値として最大水平波力の30%が同時に作用する。水平波力最大時の揚圧力は、長周期波では押し込みに作用し、上限値として最大揚圧力の40%が同時に作用する。(タイプ1, 3)

b) 合田式に対する低減率は、水平波力で90%、揚圧力で85%をとることができる。(タイプ1, 3)

c) パラベット前面に作用する衝撃波圧の最大値は、前面で碎波した場合を含めても混成堤の直立部に作用する波圧よりも小さくなる。

(3) 線形理論解析による特性

境界要素法に用いた線形理論解析と実験値との比較から解析モデルを検証するとともに、消波メカニズムの解明を行うことができた。しかしながら、各タイプの開口部の抵抗を考慮した非線形解析を実施する必要がある、この現象をモデル化した理論解析へと発展させることが今後の課題である。

謝辞：本実験の実施の際して有益御助言を戴いた港湾技術研究所の高橋重雄氏に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 田中良弘, 他 (1989): ダブル・パラベット型消波堤の開発, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 608~612.
谷本勝利, 他 (1980): 曲面スリットケーソンに働く波力について, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 330~334.
谷本勝利, 他 (1981): マルチセルラーケーソンの理特性に関する実験的研究, 港研報告, 第20巻第2号。

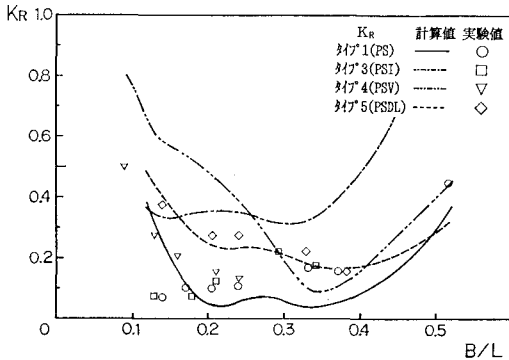


図-14 各タイプの計算値と実験値の反射率の比較

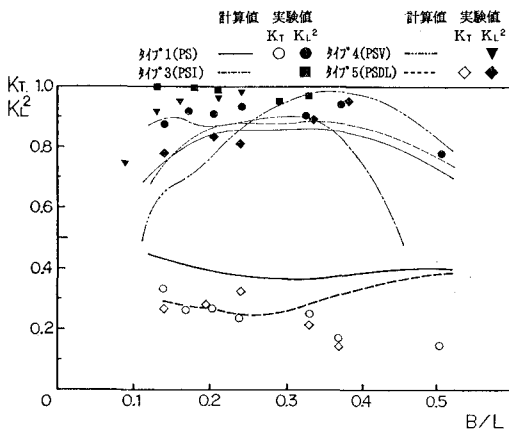


図-15 各タイプの計算値と実験値の透過率及びエネルギー損失率の比較