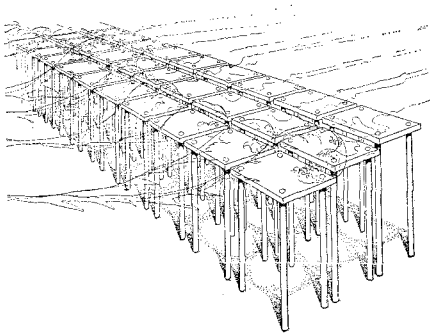


ステップ式消波堤の水理特性に関する研究

藤田 良一*・樋江井夕紀夫**・秋山 義信***
吉原 裕美****・植田 政明*****

1. はじめに

近年、海洋性リゾート等において、自然と調和した付加価値の高い海洋空間に対するニーズが増大しており、各種の新型消波構造物が提案されている。著者らも、構造がシンプルで、景観に優れた静穏海域を造成する消波構造物として、図一1に示すような3枚の没水平板を階段型に配置した、複合式没水平板型消波堤『ステップ消波堤』の開発を進めている。ステップ式消波堤は、①碎波（階段型に配置した平板により、斜面上での碎波と同一の消波効果を期待）、②戻り流れ（平板上下の波動場の位相差により発生する戻り流れによる碎波の促進）、③造渦によるエネルギー逸散（平板端部から発生する渦による消波）など、複数の消波機構を有するため、低反射で高い消波効率の期待できる消波構造物である。今回は、水理模型実験により、ステップ式消波堤の基本的な消波特性のほか、潮位差や不規則波を含めた波浪条件での消波特性も確認した。同時に、設計時に必要となるデータとして、波力特性も調べたので、その結果を報告する。



図一1 ステップ式消波堤概念図

2. 実験装置および実験方法

基本的な消波性能を確認するための実験には、長さ 8m、幅 0.2m、深さ 0.3m の小型水路を用い、模型縮尺を 1/100 とした。実験に用いた模型は、厚さ 2mm のステンレス板を架台によって固定するもので、平板の設置位置を調整できるようにした。なお、模型の設置位置は水路端から 4m のところとした。

透過率 K_T 、反射率 K_R は、実験模型の沖側と岸側に設置した容量式波高計による記録から、合田ら（1976）の入・反射分離法で求めた。

波圧・波力の測定および詳細な消波性能を把握するための実験には、長さ 60m、幅 0.7m、深さ 1.5m の中型水路を用い、模型縮尺は 1/20 とした。実験模型は、各平板に作用する波力を計測するために 3 体独立した構造とし、水路端から 40m のところに、設置位置を調整するための架台を介して、上部より六分力計によって固定した。なお、平板には厚さ 3cm の塩化ビニール板を使用した。また、波圧を計測するために、平板の中央部に 10 個の波圧計（上面 4 個、下面 4 個、沖側側面 1 個、岸側側面 1 個）を取り付けた。

表一1に、両実験における実験条件を示す。また、縮尺 1/20 の消波実験では、不規則波による実験も若干行った。不規則波には、Bretshneider・光易型の周波数スペクトルを用い、波高 $H_{1/3}=9.5\sim21.6\text{ cm}$ 、周期 $T_{1/3}=1.33\sim1.81\text{ 秒}$ の範囲で実験を行った。

表一1 実験波条件

	消波実験		波力実験
	縮尺 1/100	縮尺 1/20	縮尺 1/20
水深(cm)	20	90, 95, 100	90, 95, 100
波高(cm)	2, 4, 6	5, 10, 20, 30	30
周期(sec)	0.5, 0.6, 0.65,	1.12, 1.34,	1.34, 1.79,
	0.7, 0.8, 0.9,	1.57, 1.79,	2.24, 2.68,
	1.0, 1.2	2.01, 2.24	3.13

* 正会員 工修 鹿島建設(株) 海洋開発室 主査
** 正会員 工修 鹿島建設(株) 海洋開発室
*** 正会員 工修 鹿島建設(株) 技術研究所
**** 正会員 鹿島建設(株) 技術研究所
***** 正会員 鹿島建設(株) 土木設計本部 設計長

3. 消波特性

3.1 最適形状の把握

図-2 に、実験に用いたステップ式消波堤および消波性能比較のための単体水平板型、傾斜板型の消波構造物の模型形状を示す。ステップ式消波堤の最適形状は、堤体を構成する没水平板の間の仮想傾斜角（各平板の中心を結んだ線の傾き）、没水深等をパラメータとして消波性能の比較実験を行い、最も消波性能の良い形状とした。また、ステップ式消波堤の最適形状と単体水平板型、傾斜板型の消波性能の比較も行った。

図-3 に示したのは、岸側平板の没水深を現地換算で 1m に固定し、仮想傾斜角が 4, 8, 12, 16, 21° の模型で現地換算波高 2m の場合の消波性能を比較した結果である。図中の横軸は堤体幅波長比 B/L 、縦軸は透過率お

よび反射率である。図より、透過率は仮想傾斜角 8° の場合が、広範囲の波に対して最も小さくなることがわかる。反射率については、仮想傾斜角 4° の場合に多少大きくなるが、8~21° の場合には大きく変わらないことがわかる。また、現地換算波高 4m と 6m の場合についても、ほぼ同様な実験結果が得られた。したがって、総合的な消波性能が最も優れたステップ式消波堤の最適形状は、仮想傾斜角 8° の場合であることがわかった。

図-4 は、従来より提案されている単体水平板型および傾斜板型の消波構造物とステップ式消波堤（仮想傾斜角 8°）の消波性能を比較した結果である。構造物の堤体幅 B は全て同じとし、傾斜板型消波構造物では傾斜角を 8° とした。図中の横軸は、堤体幅波長比 B/L 、縦軸は透過率および反射率であり、入射波高は現地換算 2m である。図より、透過率はステップ式消波堤が最も小さく、反射率は傾斜板型と同程度で単体水平板型より非常に小さいことがわかる。なお、ステップ式消波堤の消波性能は、 $B/L > 0.3$ （現地換算周期 9.0 秒以下）で、透過率 0.30 以下、反射率 0.25 以下と、評価することができる。

目視による観察および実験結果から、ステップ式消波堤による消波現象は、図-5 の概念図に示したような、3つの消波機構から成るものと考えられる。

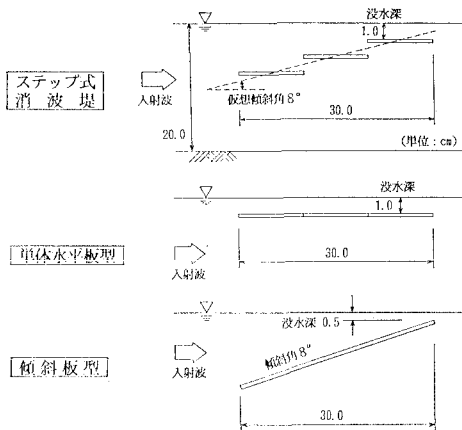


図-2 実験模型形状 (模型縮尺 1/100)

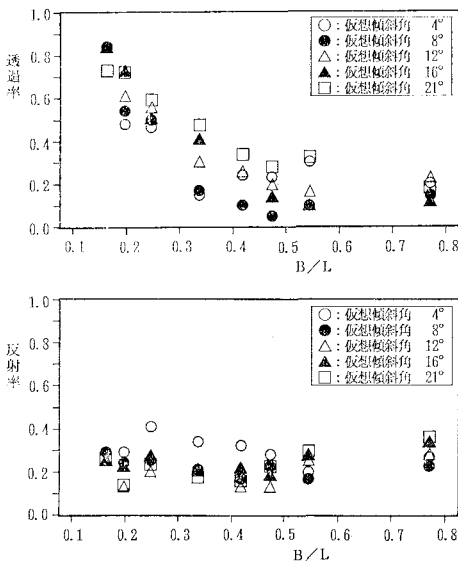


図-3 仮想傾斜角による消波性能比較

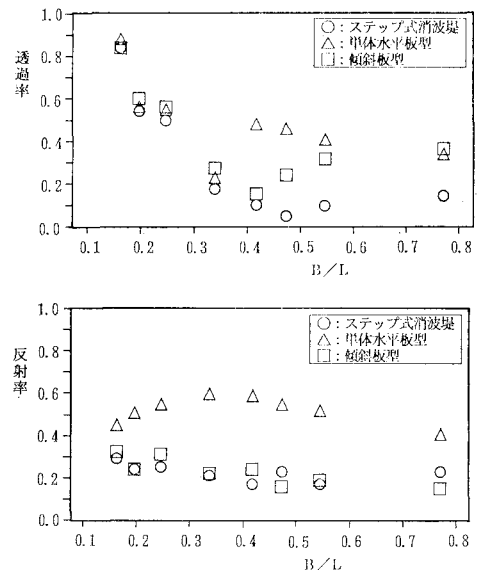


図-4 各堤体の消波性能比較 (縮尺 1/100)

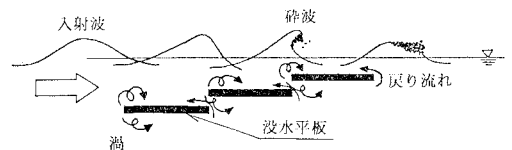


図-5 ステップ式消波堤の消波機構

① 平板上での碎波

階段型に配置した平板の粗度の効果で、波の浅水変形による碎波が促進される。

② 平板岸側からの戻り流れ

平板上下の波動場の位相差により発生する戻り流れによる碎波の促進。

③ 造渦によるエネルギー逸散

平板端部から発生する渦によって消波する。

3.2 潮位差による消波性能

没水平板型構造物の消波性能は、堤体幅波長比のほか、堤体の没水深の影響により大きく変化するため、実海域では、潮位差による消波性能の変化が予測される。そこで今回は、実海域での潮位差を2mに設定し、縮尺1/20で消波性能を確認した。図-6に示したのが、ステップ式消波堤の潮位差による消波性能の変化である。図中の横軸は堤体幅波長比 B/L 、縦軸には透過率および反射率をとっている。実験模型は、岸側平板を M.S.L. (没水深 0 cm) に合わせたため、H. W.L. で没水深が 5 cm、L. W.L. では岸側平板が水面上に出た状態で、没水深が -5 cm となる。実験結果より、波高が比較的小さい 10 cm の場合には、堤体の没水深 (潮位) によって消波性能が大きく変化し、L. W.L. の場合には、透過率、反射率ともに 0.3 程度大きくなる可能性があることが確認できる。これは、L. W.L. で、波高が小さい場合には、岸側平板が常に水面上に位置するため、消波に寄与する平板が2枚となり、透過率が大きくなったものと考えられる。反射率については、沖側平板の没水深が浅くなるために、大きくなったものと考えられる。一方、L. W.L. の場合でも、大波浪時には水面変動が大きくなるため、静水面上に位置する岸側平板が、水面下に没し

て消波効果に寄与するため、透過率、反射率とも潮位による変化がほとんどなくなる。

以上より、ステップ式消波堤は、仮想傾斜角 8° で、岸側平板が M.S.L. に一致するように配置した場合、現地換算波高 2 m、周期 8.0 秒以下では、2 m の潮位差に対しても、透過率 0.6 以下、反射率 0.5 以下を確保できることがわかった。

また、図-6 には、不規則波に対するステップ式消波堤の消波性能も合わせて示したが、不規則波に対する消波性能の低下はほとんどなかった。

4. 波力特性

図-7 に、波高 $H=30$ cm、周期 $T=3.13$ 秒、没水深 0 cm のときの各平板に作用する鉛直波力、水平波力の時系列波形を示す。鉛直波力 F_z は上向きを正とし、水平波力 F_x は波の進行方向を正とした。ここで示した波力は、いずれも平板表面に作用する波圧を積分することにより求めた値である。今回の実験では、模型の構造上、分力計で計測した波力は、架台に作用する波力も含むことになるため、波力を過大に評価する恐れがある。鉛直波力の場合には、平板の作用面積が大きいいため、分力計値と波圧積分値との差が小さいが、水平波力の場合には、架台と平板の作用面積がほぼ同じとなるため、分力計値が波圧積分値の約2倍となる。そこで、波圧積分値により波力を評価した。

図-7 より、静水面と同じ高さに位置する岸側平板の鉛直波力および水平波力に衝撃的な波力が作用しているのがわかるが、波浪条件によっては、碎波水深付近に位置する中央平板にも、衝撃的な波力が作用することがわかった。衝撃的な波力が発生する可能性として、鉛直波力の場合には下記の2種類が考えられる。

① 碎波した水塊が平板上面を叩きつけることにより生じる下向きの衝撃力。

② 波谷の時に平板より水面が下がり、水面上昇時に空気を巻き込んで平板下面を叩きつけることにより生じ

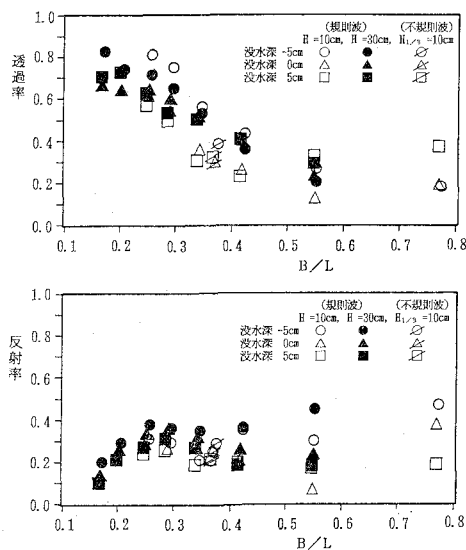


図-6 堤体没水深による消波性能 (縮尺 1/20)

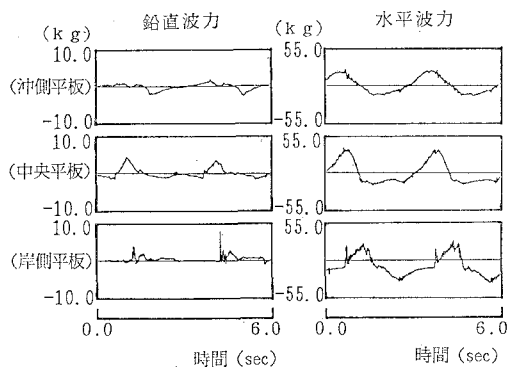


図-7 各平板に作用する波力の時系列波形

る上向きの衝撃力。

水平波力の場合には、上記①と同様に、砕波後の水塊が鉛直面に叩きつけることにより衝撃力が発生する可能性がある。図-7に示した衝撃波力は、水面の上昇時に発生していたことおよび鉛直上向きの波力であることから、上記の②衝撃波力であると考えられる。

また、図より各平板に作用する鉛直波力、水平波力の最大値の発生に位相差があることが確認できるが、これは、ステップ式消波堤に作用する波力の低減に大きく寄与していると考えられる。

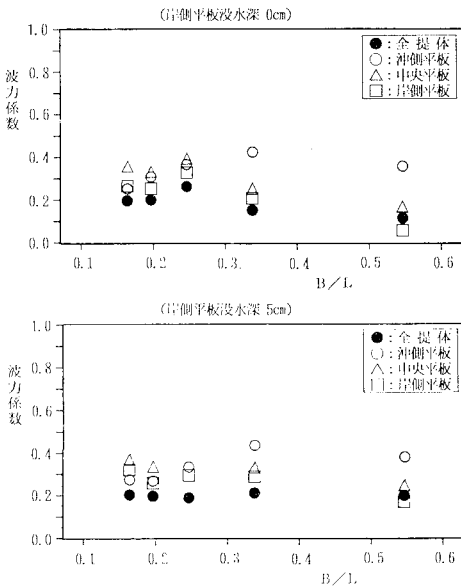


図-8 各平板および全堤体に作用する鉛直波力

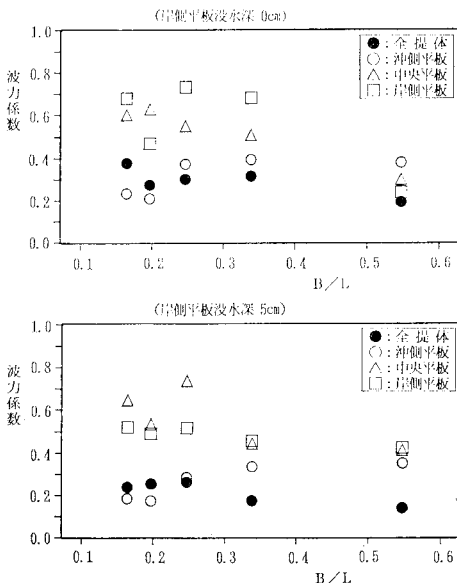


図-9 各平板および全堤体に作用する水平波力

次に、ステップ式消波堤全体に作用する波力と、各平板に作用する波力を比較した結果を示す。図-8は、ステップ式消波堤全体と各平板に作用する鉛直波力の波力係数 $F_z/(\rho g A_z H_0)$ を示したものである。ここに、 F_z は鉛直波力の平均値、 A_z は作用面積である。図の上段は岸側平板の没水深が 0 cm (水深 95 cm)、下段は没水深が 5 cm (水深 100 cm) の場合であり、横軸に堤体幅波長比 B/L 、縦軸に鉛直波力係数をとっている。図-9には、水平波力 F_x の平均値について同様の処理をした結果を示した。図-8, 9より、堤全体に作用する波力が、各平板に作用する波力の最小値とほぼ同程度であることがわかる。したがって、ステップ式消波堤全体に作用する波力は、各平板に作用する波力を単純に合計した値に比べ、10~25% 程度になっている。各平板に比べて、堤全体に作用する波力が小さくなる原因としては、次の2つが考えられる。

① 階段型に配置した平板の隙間から圧力が抜けるため、波力が低減される。

② 各平板に作用する波力には位相差があるため、堤全体としては、波力が相殺されて小さくなる。

最後に、ステップ式消波堤と単体型水平板に作用する波力を比較した結果を示す。図-10は、単体型水平板とステップ式消波堤全体に作用する鉛直波力の波力係数 $F_z/\rho g A_z H_0$ を示したものであり、図中の横軸は堤体幅波長比 B/L 、縦軸は鉛直波力係数である。単体型水平板とステップ式消波堤では、主たる消波原理が共に砕波であるため、没水深が同じ場合の波力特性が、定性的に良く似た結果となっている。ただし定量的には、ステップ式消波堤に作用する波力の方が非常に小さく、単体型水平板の50~80%程度の波力しか作用しない。これは、階段型に配置した平板の隙間から圧力が抜けることによる影響が大きいものと考えられる。

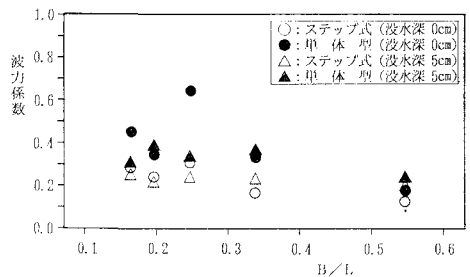


図-10 ステップ式消波堤及び単体水平板の鉛直波力

5. まとめ

今回行った消波実験および波力実験から明らかになった、ステップ式消波堤の特性は、以下の通りである。

① ステップ式消波堤の透過率、反射率が最も小さくなる最適形状は、仮想傾斜角を 8° としたときである。

② ステップ式消波堤は、従来から提案されている単体水平板型、傾斜板型の消波構造物と比べても、非常に優れた消波性能を有する。

③ ステップ式消波堤は、不規則波に対しても、規則波と同等の消波性能を確保できる。

④ 岸側平板を M.S.L. に合わせて配置することにより、2 m の潮位差に対しても、透過率 0.6 以下、反射率 0.5 以下を確保できる。

⑤ ステップ式消波堤は、単体水平板型の消波構造物に比べ、優れた消波性能を有しながら、堤体に作用する波力が小さく、鉛直波力で 50~80% 程度である。

今回は、ステップ式消波堤の水理特性を水理模型実験から明らかにした。今後は、①消波特性および作用波力を正確に予測できる数値解析手法の開発、②合理的な施工法の検討、を進めることが課題である。

謝辞：本研究を進めるにあたり、貴重なご意見を戴い

た東京大学土木工学科・磯部教授に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 今井貫爾・秋山義信・工藤君明・續 辰之介 (1988): クレセント型没水板に働く波力特性に関する研究, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 522-526.
- 今井貫爾・永富政司・藤田良一・植田政明ほか (1991): 複合式没水平板型消波堤の開発, 第 46 回年次学術講演会講演概要集 II, pp. 888-889.
- 小島治幸・井島武士・吉田明徳 (1990): 没水水平板の消波特性と波分裂による波浪制御効果, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 594-598.
- 高橋陽一・盛高裕生・磯部雅彦・渡辺 晃 (1989): 傾斜板を用いた波浪制御構造物に関する研究, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 519-523.
- 余 錫平・磯部雅彦・渡辺 晃 (1991): 没水水平板に作用する波力に関する研究, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 671-675.