

低天端有脚式離岸堤に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON THE PILE-SUPPORTED OFFSHORE BREAKWATER WITH LOW CROWN HEIGHT

藤原隆一¹・山野貴司²・野村浩二³・長山英樹⁴

Ryuichi FUJIWARA, Takashi YAMANO, Kouji NOMURA, Hideki NAGAYAMA

¹正会員 博(工) 東洋建設株式会社 総合技術研究所 鳴尾研究所
(〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜1-25-1)

²正会員 修(工) 東洋建設株式会社 総合技術研究所 鳴尾研究所 (同上)

³東洋建設株式会社 名古屋支店 (〒460-0003 愛知県名古屋市中区錦1-17-13)

⁴正会員 東洋建設株式会社 (〒135-0064 東京都江東区青海2-43)

Beach erosion is closely related to sand budget in the coastal zone including the inland supply, so it is important to control the sediment movements adequately. A lot of blocked-type detached breakwaters have been constructed for regressing beach erosion. In recent years, a countermeasure with an environmental and utilizable point of view is necessary for the beach protection problem. Therefore newly developed offshore breakwaters, for example, pile-supported offshore breakwaters have been adopted for about twenty years in the coastal zone faced to outer sea for satisfying these demands. Moreover, a cutting of costs has been demanded these days. This report described a newly developed pile-supported offshore breakwater for cutting construction costs. Hydraulic properties of the breakwater, that is, transmission coefficients, reflection coefficients and wave forces have been examined by 2D experiments, and it has been clear that the capability of the breakwater is comparable to usual one.

Key Words : *offshore breakwater, pile-supported offshore breakwater, reflection coefficient, transmission coefficient, wave force, low-crested breakwater*

1. はじめに

海岸侵食は、陸地からの土砂の循環と密接な関係があり、抜本的には総合的な土砂管理対策が必要である。また、改正海岸法の施行後は、防護だけでなく環境・利用面との調和の取れた対策が求められるようになった。台風などによって急激な侵食が発生した場合など緊急に復旧が必要な場合には、従来の異形ブロック式離岸堤による対策が取られることもまだ多く見られる。しかし、駿河海岸を始め、外洋に面した侵食海岸では、杭によって構造物を支持する有脚式離岸堤が採用されるようになった。一般に異形ブロック式離岸堤では設置水深が大きくなる、また海底地形が急勾配になると断面が急激に大きくなるため、有脚式が有利となる。最近ではさらなる工費の縮減が求められている。^{1) 2)}

本研究では、堤体断面を縮小することで工費の縮減を図った上で、所要の消波効果を保持し、かつ①大水深でも設置が可能(設置水深10m~20m)、②天端高を低くすることで景観面を考慮、③離岸距離を大きくすることで沿岸域の利便性を高める、

④環境を考慮した有脚式離岸堤を開発することを目的に、水理模型実験によって消波効果(反射率・透過率)および波力を検討した結果について報告する。

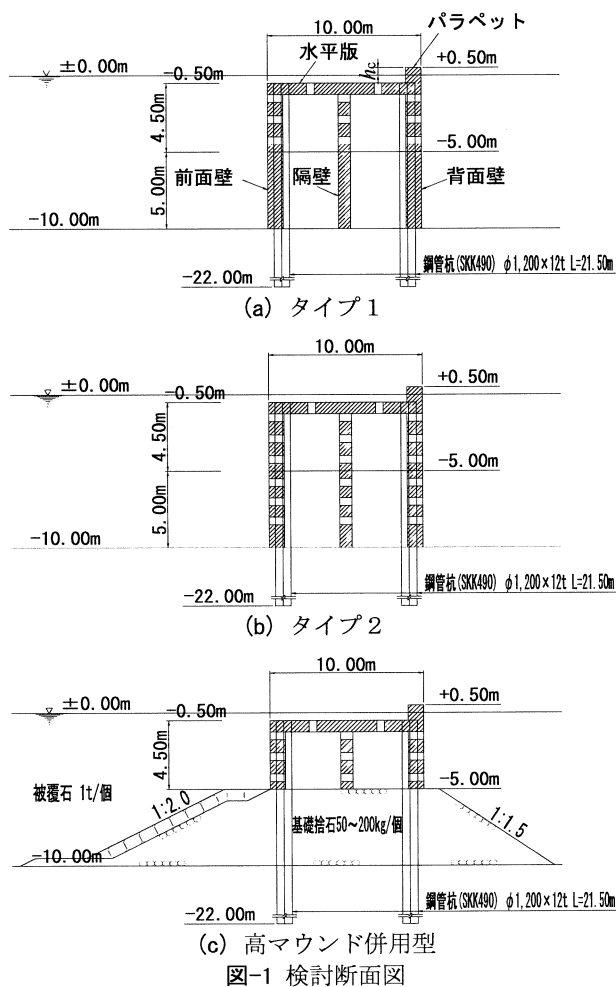
2. 実験概要

(1) 対象構造物

本研究で対象とする有脚式離岸堤の断面を図-1に示す。断面は開口率の違いや捨石マウンドの有無を含め3ケースを想定した。

タイプ1およびタイプ2では上下に堤体を分離すること、また高マウンド併用型ではこれらの上部に相当する部分だけとすることで、施工時に用いる起重機船の小型化を図るものである。堤体幅は、現地における既存の有脚式離岸堤では13~15m程度であるのに対し、現地で10mを想定した。また、天端部はパラペットを除いて静水面から0.5m没水させ低天端化を図った。パラペットの高さは構造的なことも考えて1.0m(静水面上0.5m)とし、岸側に設けた。水面下は3枚のスリット壁による透過構造とし、これらを杭で支持する。スリット

壁の開口率は従来の海域制御構造物を参考に次のように設定した。3枚の鉛直スリット壁の開口率 α_v （スリット壁に対する開口部の割合）は、タイプ1、タイプ2および高マウンド併用型でそれぞれ $\alpha_v=0.16, 0.32$ および 0.33 ，また水平スリット壁は3断面共に $\alpha_H=0.10$ とした。消波機能としては、従来の海域制御構造物で採用されている透過率 0.6 以下，反射率 0.5 以下を目標とした。



(2) 実験方法

実験は東洋建設(株)鳴尾研究所の長さ 55m，幅 1m，深さ 2m の二次元造波水路を用いて行った。水路内の仮設床，波高計および模型は図-2 に示すように配置した。実験縮尺は，消波性能実験の場合 1/25，波力実験では造波性能を考慮して 1/40 を想定した。また，波力実験では 1:10 の海底勾配を模型設置位置の前端に設置した。設置水深は現地で 10m を基本とした。

図-3 にタイプ1を代表例として波圧計の設置位置を示す。波圧計の位置は，どの断面も同じ位置とした。タイプ1およびタイプ2の場合 25 台（Ch1～Ch25），また高マウンド併用断面では 19 台（Ch1～Ch19）とした。写真-1 に波力実験で使用した模型を示す。図示はしないが，二分力計による全波力の測定も同時に行った。

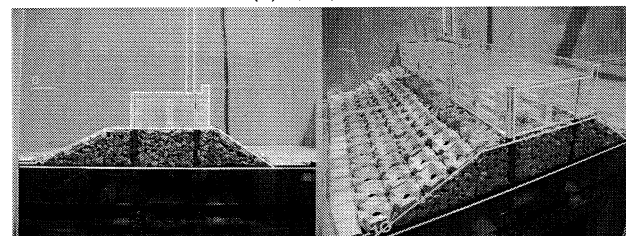
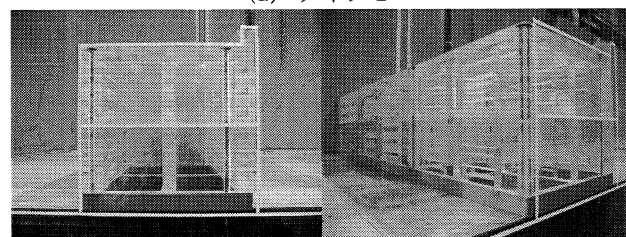
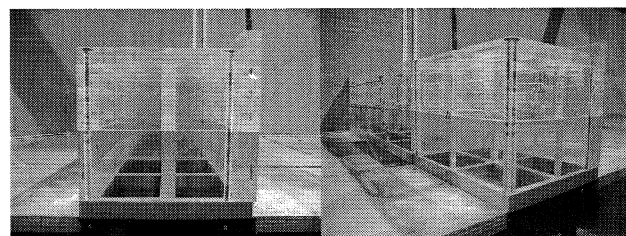
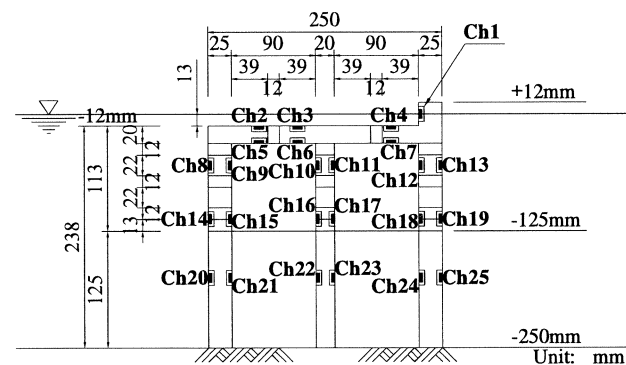
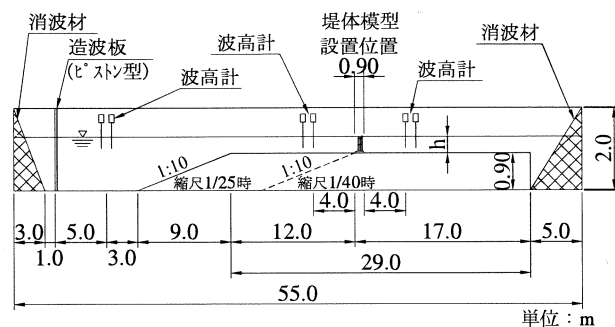


写真-1 実験模型（縮尺 1/40）

消波性能実験の対象波は，周期 $T=6\sim14s$ ，波高 $H=1\sim4m$ とし，一部短周期の波（ $T=4s, 5s$ ）についても検討を行った。波力実験については周期 $T=12\sim16s$ ，波高は，各周期で $H=4.5\sim10.0m$ 程度の間で 5 種類変化させ，碎波を含む条件で検討した。また消波性能実験では水深を 9.24m および 11.0m

とした場合についても一部の波浪条件で検討した。これらをまとめたものを表-1 に示す。

表-1 波浪条件 (現地スケール)
(a) 消波性能実験 (() 内の値は一部実施)

	水深(m)	周期(s)	波高(m)
規則波	10.0	6.0	1.0
		8.0 (4.0)	2.0
		10.0 (5.0)	3.0
		12.0	4.0
		14.0	
不規則波	10.0	8.0	2.0
		10.0	
		12.0	
(b) 波力実験			
	水深(m)	周期(s)	波高(m)
規則波	10.0	12.0	4.5~10.0 (碎波を含む)
		14.0	
		16.0	

なお、反射率は入・反射波分離推定法 (合田ら³⁾, 1976) を用い算出した。また消波性能実験における測定は周期に応じて 0.02s~0.07s, 波力の測定は 0.001s 間隔で行った。

3. 実験結果および考察

(1) 消波性能

図-4 に、横軸を堤体幅と波長の比 B/L とした透過率 K_T , 反射率 K_R およびエネルギー損失率 K_L^2 の結果を示す。エネルギー損失率 K_L^2 は式(1)により評価した。

$$K_L^2 = 1 - K_R^2 - K_T^2 \quad (1)$$

エネルギー損失率の図中の実線は $H/h = 0.10, 0.20$ の平均値, 破線は $H/h = 0.30, 0.40$ の平均値である。

図より、タイプ1の K_T は目標値 0.6 に比べて小さくなっているのに対し、 K_R は目標値 0.5 を超える場合が多い。タイプ2の場合、下部ケーソンにスリットを設けることで堤体を透過するエネルギーが増え、タイプ1に比べて K_T が大きく、逆に K_R は小さくなった。その結果、 K_T および K_R 共にほぼ目標値を満足することができた。 K_L^2 については、タイプ1およびタイプ2の平均値はそれぞれ 0.615, 0.633 とほぼ同じであったことから、タイプ1は消波に対する反射率の寄与が大きいと言える。なお、タイプ1およびタイプ2に見られる 1) K_T が B/L の増加に伴って小さくなり、 H/h が小さいとき

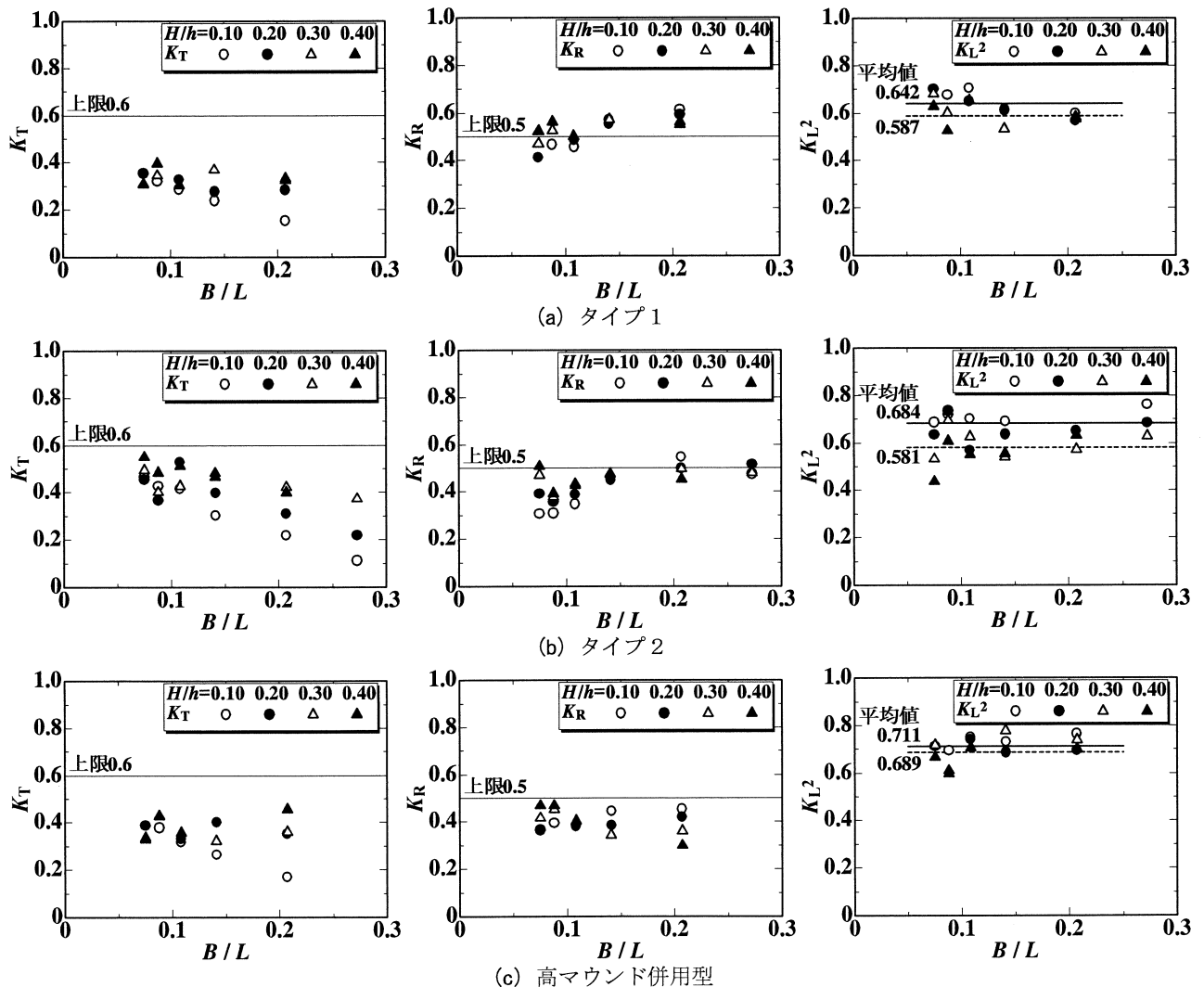


図-4 透過率 K_T , 反射率 K_R , エネルギー損失率 K_L^2 と堤体幅波長比 B/L の関係

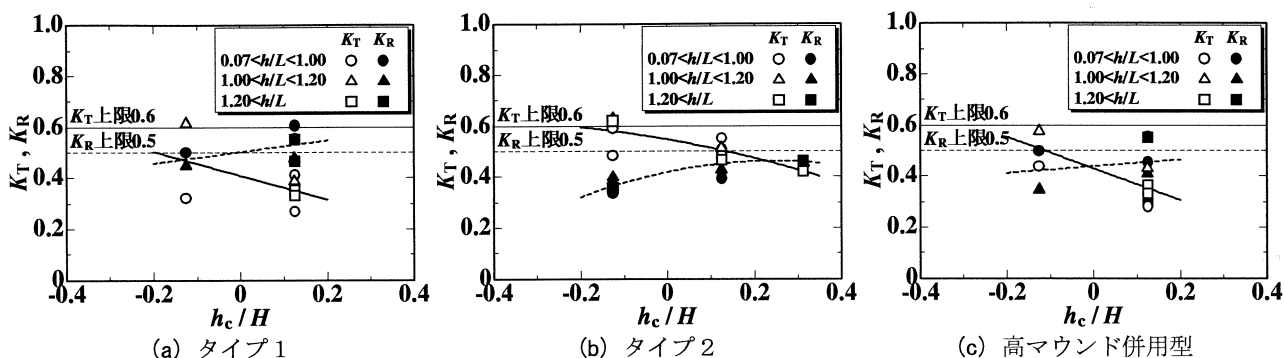


図-5 透過率 K_T 、反射率 K_R と相対天端高 h_c/H の関係

にそれが顕著になる傾向、および 2) K_R が $B/L=0.10$ 程度で極小となる傾向は、従前の H 型スリット板ジャケット式構造物¹⁾のそれと同じであった。

高マウンド併用型については、 K_T はタイプ 1 と同程度、また K_R はタイプ 2 と同程度となった。このことから、マウンドによる波の変形がスリット版および遊水室内でのエネルギー損失を高め、主に反射率の低減に寄与したと考えられる。 K_L^2 の平均値は 0.700 で、今回の検討断面中で最大となった。

図-5 は、横軸を相対天端高 h_c/H として水深変化の影響を調べた結果である。いずれの断面においても、 h_c/H が大きくなるにしたがい K_T は小さく、逆に K_R は大きくなっている。 K_T については、いずれの断面も $h_c/H > 0.1$ で 0.6 以下を満足している。 K_R については、タイプ 1 では $h_c/H < 0.0$ 、またタイプ 2 では $h_c/H < 0.3$ で 0.5 を満足している。高マウンド併用型もタイプ 2 と同程度である。

また、不規則波に対する結果は紙面の都合上ここで示すことはできないが、 $T_{1/3}$ を規則波の周期 T と対応させて K_T を比較すると、混成防波堤の結果⁴⁾と同じくよく一致した。

(2) 波力特性

a) 波圧合力の検証

波圧計で測定された波圧合力は二分力計により測定された水平波力と時間変化およびその最大値ともによく一致した。代表的な例として、非碎波の $T=2.53s$ (現地 16s)、 $H=20.0cm$ (現地 8m) の場合をタイプ 2 について図-6 に示す。このことから、以下では波圧合力を用い、波力の評価を行った。

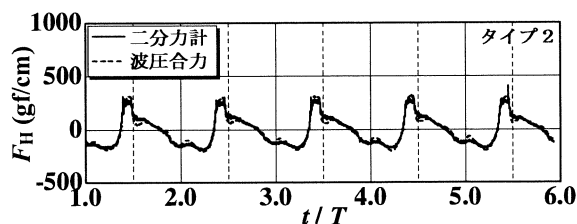


図-6 二分力計による波力および波圧合力時系列の例

b) 波圧・波力時系列

図-7 にパラペット部 (Ch1) および堤体前面上部 (Ch8) の波圧、水平波力 F_H および鉛直波力 F_V の

時系列の代表的な例を示した。条件は図-6 と同じである。図中には F_H および F_V の最大時刻を併せて示した。

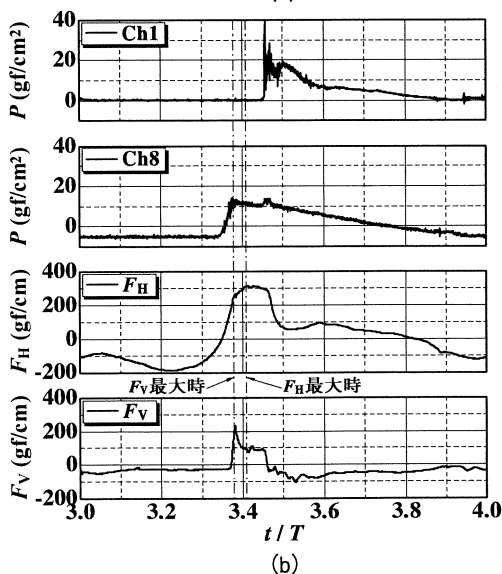
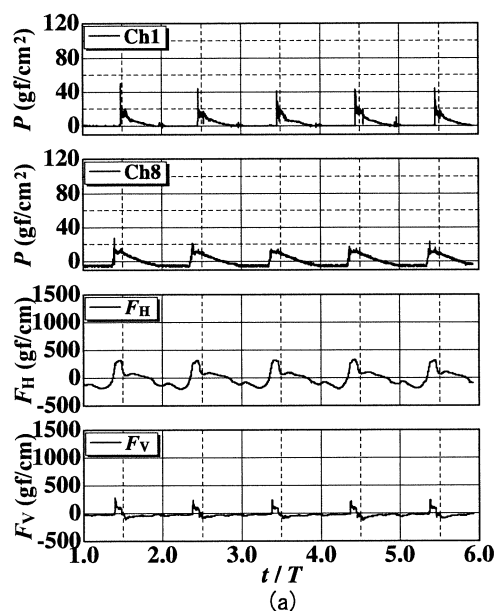
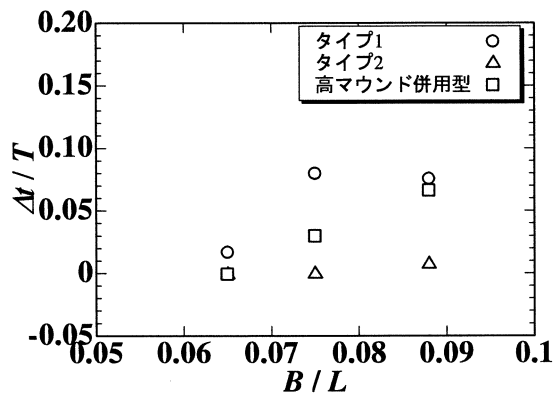


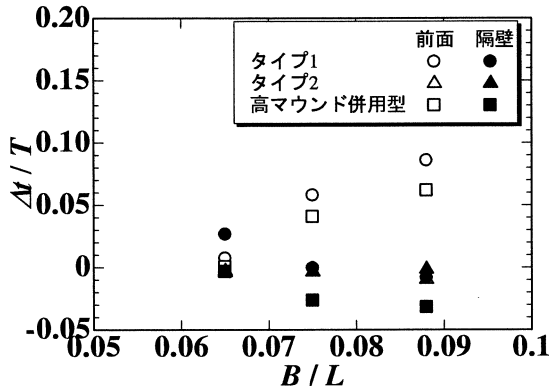
図-7 波圧および波力時系列の例
(タイプ 2 : $T=2.53s$, $H=20.0cm$)

パラペット部 (Ch1) は堤体背面に位置しているため、前面壁の波圧より位相が遅れている。また、

図-7(b)は1波分について拡大した図であるが、前面壁上部の波圧(Ch8), F_H および F_V の最大値はほぼ同時に発生していることが分かる。 F_H が最大となる時刻からの無次元位相差 $\Delta t/T$ (F_H が遅い場合に正と定義)を F_V の最大値と、また前面壁および隔壁の波圧合力について示した結果を図-8 に示す。いずれの場合も $\Delta t/T = -0.1 \sim 0.1$ の範囲にあり、発生時刻はほぼ同時と言える。構造物ごとの比較ではタイプ2の場合が最も小さい。また、 B/L が大きくなると位相差が大きくなる傾向にあるが、そのときの前面壁および隔壁の波圧合力との位相差はそれぞれ正および負となる傾向にある。すなわち、 B/L が大きくなると、波の峰が隔壁に近づいたときに水平波力が大きくなるようである。



(a) 水平波力と鉛直波力の位相差



(b) 前面壁および隔壁の波圧合力と水平波力の位相差

図-8 波圧と波力の位相差

c) 波圧分布

図-6 と同じ条件の水平波力最大時の堤体各壁面に作用する波圧分布および高さごとの合計値を図-9 に示す。図中の実線は合田式による波圧分布、破線は合田式の 60%を表している。各壁面に作用する波圧に着目すると、前面壁および隔壁では水面付近で波圧が大きくなるような分布形状となっている。一方、背面壁の波圧は小さくなっている。波圧の高さごとの合計値で見ると、合田式の分布形状とほぼ相似形状であり、この条件では合田式の 60%によく一致していることが分かる。他のケースでも同様の傾向が見られたことから、水平波力は合田式に波力低減係数を乗じた形で推定できると考えられる。

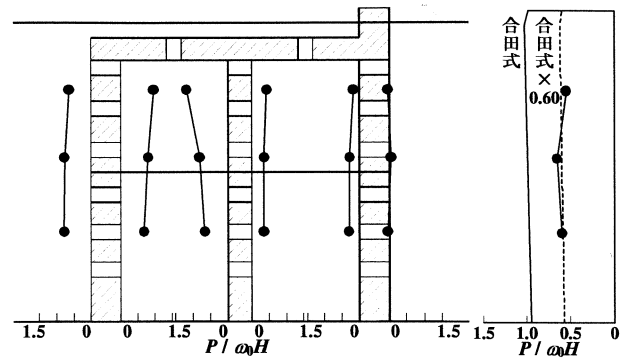


図-9 水平波力最大時の波圧分布およびその合計値

d) 最大波力特性

次に、無次元最大水平波力 F_H/w_0H と h/L および H/h の関係を調べた結果を図-10 および図-11 に示す。図中には合田式に波力低減係数を乗じて得られる波力を併せて示した。いずれの断面においても

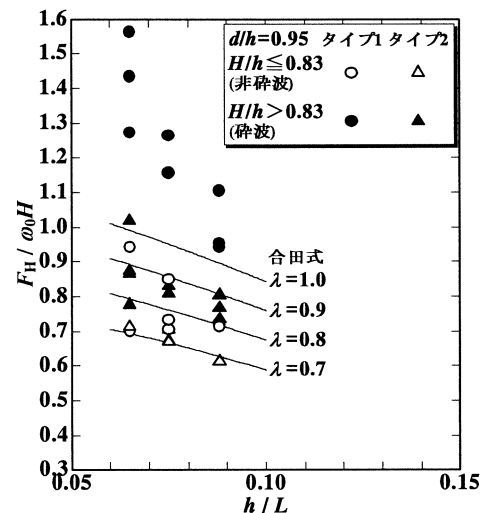


図-10 最大水平波力と波高、周期の関係(タイプ1, 2)

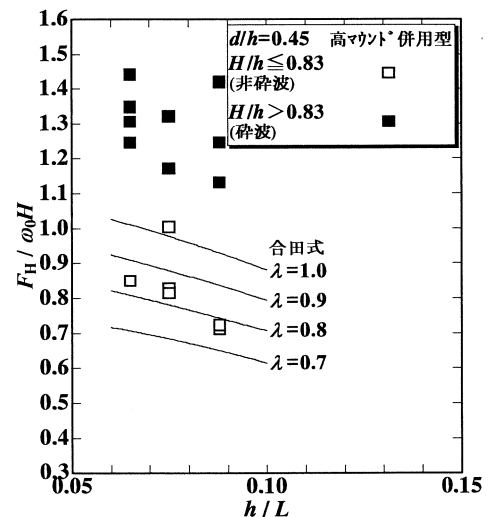


図-11 最大水平波力と波高、周期の関係(高マウンド併用型)

h/L が小さいほど、また H/h が大きいほど F_H/w_0H が大きくなったが、この傾向は萩原ら⁵⁾の行った鉛直スリット壁が3枚の海域制御構造物と同様であつ

た。タイプ1および高マウンド併用型の場合、砕波時の波力が非砕波時に比べて大きくなる割合がタイプ2に比べて顕著である。タイプ1の場合はタイプ2に比べて開口率が小さく反射率が大きくなること、また高マウンド型の場合はマウンドによって衝撃的な波が作用しやすくなることが原因と考えられる。

図-12 は、タイプ2について無次元最大鉛直波力 F_V/w_0H と h/L および H/h の関係を調べた結果であるが、平均して水平波力の 50%程度となった。水平壁の開口率を 20%程度とすることで、透過率および反射率に影響することなく鉛直波力を大きく低減することが可能と考えられるが、今後の課題である。

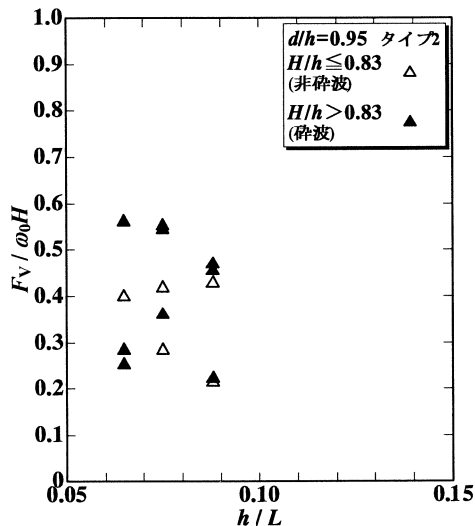


図-12 最大鉛直波力と波高、周期の関係

以上より、タイプ1および高マウンド併用型では砕波が生じるときに水平波力が強大となることから、タイプ2が優れていると言える。また、タイプ2の波力の変化は合田式に波力低減係数を乗じた波力のそれとよく似ており、先述した合田式を用いた波力算定の妥当性が示されている。

次に、今回検討した断面は低天端堤であることから、藤原ら⁹⁾が示した低天端ケーソン堤の波力特性と今回の結果を比較した(図-13 参照)。縦軸の λ_K は、最大水平波力と合田式の比を波力低減係数として示している。また図中には藤原らの提案する波力低減範囲を併せて示した。藤原らの結果は、1/100 勾配に対する結果であり、今回のような急勾配条件(1/10)とは異なるので直接の比較は難しい。ただし、急勾配になっても不透過堤の場合と同程度の波力低減が得られており、透過構造による波力低減効果が得られていることが推察される。また、アーセル数が大きくなるにしたがい λ_K が大きくなる傾向は藤原らの実験結果にも表れており、波の作用状況に応じた作用波力の変化特性はよく似ていると考えられる。今回得られた波力低減係数は、非砕波および砕波の場合でそれぞれ $\lambda_K = 0.7$ および 0.9 とすればよいと考えられる。ただし、砕波時でアーセル数が 300 程度の場合は $\lambda_K = 1.0$ となることに注意が必要である。

今回は海底勾配が 1/10 であり作用波力、特に砕波時の波力が大きくなる条件を選んだので、得られた波力低減係数は設計時の上限に近いと考えられる。海底勾配が緩やかな場合の作用波力の低減の度合いは今後の課題となるが、堤体に作用する波力特性は把握できたと考えられる。

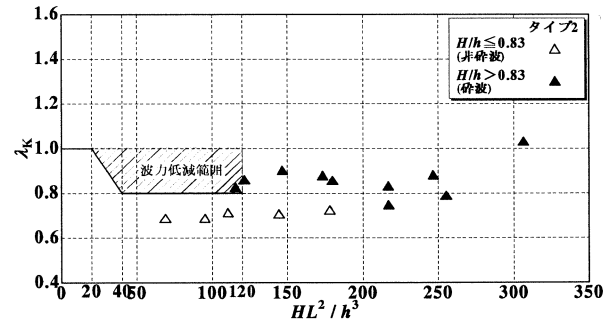


図-13 波力低減係数とアーセル数の関係

4. まとめ

本研究によって明らかになった点を以下に示す。

- ① 水理模型実験によってタイプの異なる3断面に対する消波特性および波力特性を明らかにした。
- ② 3断面の中では、上下に分割したいずれにも開口部を有するタイプ2の断面が、所定の消波性能を満足し、波力低減も得られることが明らかとなった。
- ③ タイプ2の波力については、合田式に波力低減係数を乗じることで、水平波力の推定が可能である。

今後は、水平壁の開口率を 20%程度とした場合の検討に加え、部材波圧や局所洗掘、また CADMAS-SURF などを用いた数値シミュレーションの可能性について検討し、設計手法の確立を図りたい。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所：MMZ 計画策定の手引き(案)，土木研究所彙報，第 57 号，1992。
- 2) 建設省土木研究所河川部海岸研究室：海域制御構造物の開発に関する共同研究報告書(8)，土木研究所資料，第 2701 号，1989。
- 3) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地治：不規則波実験における入・反射波の分離推定法，港湾技研資料，No. 248，1976。
- 4) 合田良実・鈴木康正・岸良安治：不規則波浪実験とその特性について，海岸工学論文集，第 21 回，pp. 237-242，1974。
- 5) 萩原運弘・藤原隆男・宇多高明・村井禎美：スリット型海域制御構造物の砕波力特性と設計波力，海岸工学論文集，第 36 巻，pp. 514-518，1989。
- 6) 藤原隆一・貝沼憲男・興野俊也・石崎崇志・小竹康夫・津田宗男：低天端ケーソン堤に作用する波力特性について，海岸工学論文集，第 43 巻，pp. 761-765，1996。