

没水水平板および不透過潜堤による波の分裂と制御に関する実験的研究

九州大学 正会員 小島 治幸
東和大学 正会員 井島 武士

1. はじめに

近年、沿岸海域の利用は、広範囲かつ多様化し、構造物の設置水深は大きくなる傾向が強まっている。この様に水深が深くなると浅水変形のない長波長の波が構造物に直接作用することになり、その安定のために波力を軽減することが重要な課題となっており、一つの方法として没水水平板が考えられている。例えば、井島ら¹⁾は微小振幅波の仮定のもとで計算を行いその通過率と反射率を明らかにし、服部ら²⁾は、長波近似の解析ではあるが、砕波を考慮した計算方法を示している。また最近、田淵ら³⁾は、水平板と直立壁を組み合わせて砕波減衰を考慮した最適断面を提案し、高木ら⁴⁾は砕波を伴う水平板の消波効果についての実験的な研究を報告している。

これらの研究は主として波の作用を軽減するための波高の低減に着目したものと見られる。これらの研究とは異なり、著者らは、入射波が没水水平板を通過するとき起こる波峰の分裂効果に着目した研究を行ってきた^{5), 6), 7)}。この分裂現象は、水面波が浅海部を進行すると、一つの波峰がいくつもの波峰に分かれるソリトン分裂の現象が起こり、入射波が波長の短い波に変形するものである。波長を短くすることによる波の制御効果として、著者らは、防波堤に対する波力を砕波を起こすことなく50%程度まで軽減することができ⁷⁾、長波長の波に対する遮断効果の低い透過性構造物においては、あらかじめ短波長の波に分裂させたのち、作用させることによって効果的に消波できることを確認した⁵⁾。このように、波峰の分裂を生ずる没水水平板は、波高を低減させる従来の方法とは異なった波の制御方法となりうる可能性がある。

本論文は、二次元水路実験により、水平板によって分裂した波が再び深い海域を進行するときの挙動を調べると共に、水平板直下の流体域の影響を見るために堤体幅と天端水深の条件を同一にした矩形不透過潜堤との比較検討を行い、それら没水物体による波の分裂現象を明らかにするものである。

2. 水理実験の方法と条件

実験は、図-1に示すような二次元水路(長さ28m、幅0.30m、深さ0.50m)を用い、水深を $h=0.38$ mとして、天端上水深 $h_s=10.7$ cm($h_s/h=0.263, 0.184$)となるように1cm厚の水平板を水路の中間点よりやや造波板側に設置した。まず、水深減少のみによる波の分裂現象を調べるため、水平板を水路の他端まで延ばして無限

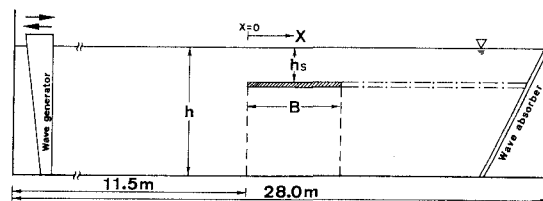


図-1 実験装置図

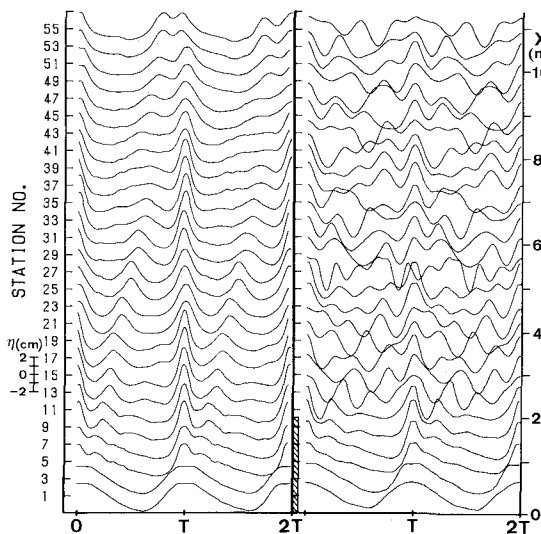
長と見なされる場合と、水平板上で分裂した波が再び初めの水深の海域を進行する場合を調べるため長さBを水深の10.50倍および5.25倍、2.00倍とした場合の4種類について考察した。この水路の一端に、吸収式造波機により規則波を発生させ、造波板から3.0m(水平板前端から7.5m)において入射波を計測し、次のような測定を行った。(1)分裂波の進行状態を調べるため、無限長と有限長の水平板において $h/L=0.070, 0.100, 0.137$ の3種類の波について水平板の始端より波の進行方向(x方向)に測点間隔20cmで水面変位を計測した。この場合、多点における同時測定は実験手法の上で困難なため、4本の波高計を台車上に20cm間隔で固定し、その台車をx方向に移動して、各測点において10~15波の波形をサンプリング間隔50msで記録した。(2)水平板および矩形不透過潜堤による分裂波の発生と成長を調べるため、入射波の相対水深 h/L を0.060~0.450、各々につき入射波高を $H_0=2.5\sim6.5$ cmで変え、水平板の終端より0.20mのところから1.0m間隔で3本の容量式波高計を設置して水路終端の消波面からの反射波の影響のない6~10波程度の水面変位を測定した。

3. 結果と考察

3.1 分裂波の水深変化にともなう挙動

(1) 時間波形の場所的变化

図-2は、4測点づつ同時に測定された記録のうちの2測点での時間波形 $\eta(t, x)$ を、比較のため、各々の主峰(最大水面変位を示す波峰)位置を横軸の零にそろえて図示したものである。図-2の(a)は微小振幅の規則波(波形勾配は $H_0/L=0.0066$)が無限長の水平板上を進行するときの波形の変化を表しており、(b)は水深の5.25倍の長さをもつ水平板(STATION NO.10まで板がある)上を同じ波が進行し再び水深の深い海域を進むときの波形の変化を表している。図-2(a)に示すように、規則波が水深 h_s の水平板上を進行するにいたが、波の分裂が始まり、明確な3つのソリトンが発



(a) 無限長水平板 (b) 有限長水平板
図-2 時間波形の場所的变化

生している。波高の大きい第1のソリトンは、波速が速いため、第2、第3のソリトンに追いつき追い越す現象がみられ、そのとき2つの波峰が重なる場所での波高はその点の前後の波高よりも低くなるソリトン特有の性質がみられる。一方、図-2(b)に示すように有限長の水平板上で分裂した波が、再び水深 h の深い水域を進むときは、波峰の形は進行とともに変形し、特定の波峰を追跡することはできない。そして、第2、第3の波峰は場所によっては主峰の波高とほぼ同じ程度の大きさとなり、見かけ上、入射波の周期が不規則に短縮する様子がうかがえる。

(2) 調和解析とバースペクトル解析

図-2で示した各測点で計測された時間波形 $\eta(t, x)$ を調和解析すると、各成分波の振幅 $A_m(x)$ は、有限フーリエ近似を用いて次式で表せる。

$$A_m(x) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \eta_n(x) \cos(i\sigma_m n \Delta t) \quad (1)$$

ここに、 $m=0 \sim N/2$ で、 N は離散化したデータの個数、 $\sigma_m = 2\pi m / T^*$ 、 $T^* (=N \Delta t)$ はデータ長である。また、二つの成分波間の二次的な非線型干渉の程度を表すバースペクトル $B(\sigma_1, \sigma_2)$ は、水位変動の三次相関 $R(\tau_1, \tau_2)$ のフーリエ変換として定義され、次式で与えられる⁸⁾。

$$B(\sigma_1, \sigma_2) = (2\pi)^{-2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau_1, \tau_2) \exp \{ -i(\sigma_1 \tau_1 + \sigma_2 \tau_2) \} d\tau_1 d\tau_2 \quad (2)$$

ここに、

$$R(\tau_1, \tau_2) = \frac{1}{T^*} \int_{-T^*/2}^{T^*/2} \eta(t) \cdot \eta(t+\tau_1) \cdot \eta(t+\tau_2) dt \quad (3)$$

いま、任意の角周波数 σ_m, σ_n をもつフーリエ成分波のバースペクトルは、式(2)より次式のようになる。

$$B(\sigma_m, \sigma_n) = \frac{1}{T^*} \lim_{T^* \rightarrow \infty} \frac{F(\sigma_m) F(\sigma_n) F(\sigma_{m+n})}{T^*} \quad (4)$$

ここに、 $F(\sigma_m)$ はフーリエ振幅を表し、式(1)の A_m とは、 $F(\sigma_m) = A_m T^*/2$ の関係がある。この場合、入射波が単一周波数の規則波であれば、水平板上の浅い水域における非線型干渉により生じる成分波は、基本周波数の整数倍の周波数をもつ波である。これより、基本角周波数 $\sigma_1 = \sigma = 2\pi/T$ (T は入射波の周期)とその2倍角周波数 $\sigma_2 = 2\sigma$ 、3倍角周波数 $\sigma_3 = 3\sigma$ の振幅 A_1, A_2, A_3 をもつ3つの成分波を考えると、バースペクトルの成分として存在するのは、 $B(\sigma, \sigma)$ と $B(2\sigma, \sigma)$ の2つであり、 A_1, A_2, A_3 を用いてそれぞれのバースペクトルは次のように求められる。

$$B(\sigma, \sigma) = A_1^2 A_2 T^{*2} / 8 \quad (5)$$

$$B(2\sigma, \sigma) = A_1 A_2 A_3 T^{*2} / 8 \quad (6)$$

図-3と4は、各々の図の下段に基本周波数およびその2倍、3倍周波数の振幅 A_1, A_2, A_3 の場所的な分布を、上段に主峰(H_m)と二次波峰(H_s)の波高分布を図示したもので、図-3に無限長水平板、図-4に有限長水平板の結果を示しており、波高、振幅ともそれぞれ入

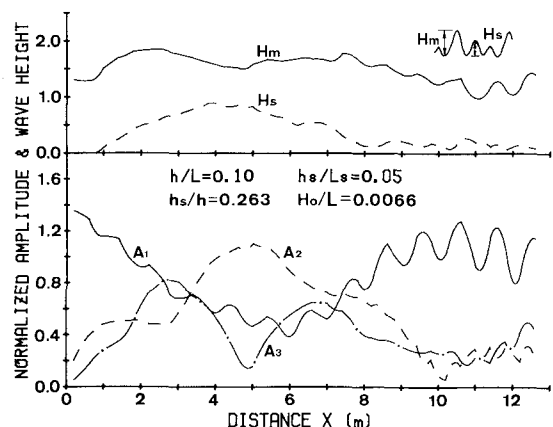


図-3(a) 無限長の水平板における波高と各成分波の振幅の分布($h/L=0.100$)

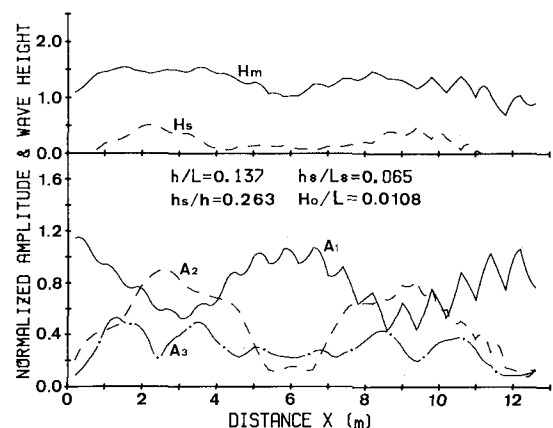


図-3(b) 無限長の水平板における波高と各成分波の振幅の分布($h/L=0.137$)

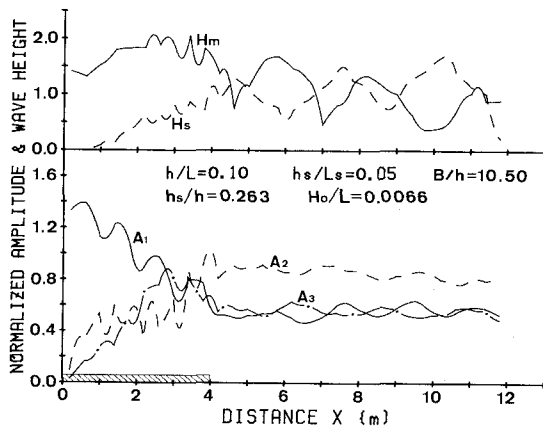


図-4(a) 有限長の水平板における波高と各成分波の振幅の分布($B/h=10.50$)

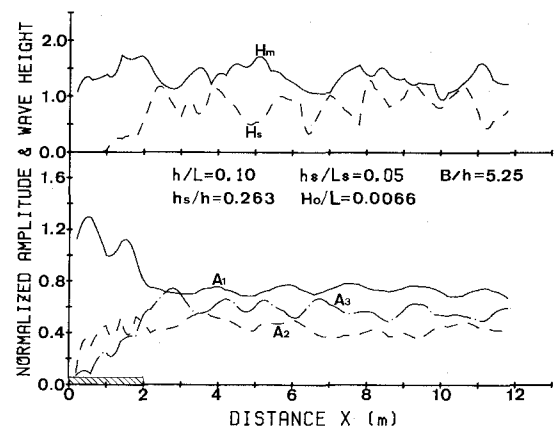


図-4(b) 有限長の水平板における波高と各成分波の振幅の分布($B/h=5.25$)

射波の波高と振幅により無次元化されている。なお、本実験の造波装置による入射波形の調和解析においては、基本角周波数 σ の振幅に対して 2σ や 3σ の高周波の振幅は0.01倍以下で無視される程度である。無限長水平板における結果の特徴として、前述のような主峰の追越し現象や図-3(b)に示されているように波高と各成分波の振幅が再帰距離を波長として場所的に繰返して同じ形になっていること($x=0, 6, 12\text{m}$ における A_1 の極大点と H_m の極小点に対応する)等、ソリトンの性質をよく表している。また、各成分波の振幅が場所的に変動することより、ソリトンが進行する過程において各成分波間でエネルギーの交換が行われていることも示唆される。

一方、分裂した波が再び深い海域を進行すると、浅い海域の場合と異なり、各成分波の振幅はわずかの動揺を示すがほとんど一定である。ところが主峰 H_m や二次波峰 H_s の波高は、場所に関して規則的に変動している。これら分裂した波の各成分波がそれぞれの周波数に対応する位相速度で独立に進行し、各成分波の位相が合う場所では主峰の波高が増大し、位相がずれるにしたがって減少するといった現象が起こっていることを示唆している。また図-4(a)のように、水平板通過後に2倍周波数の振幅 A_2 が1倍の A_1 より大きくなることは、入射波をその波長より短波長の有義波に変換する可能性をも示唆している。この水平板通過後における各成分波の振幅の大きさは、図-3(a)と4より

分かるように水平板の長さに関係しており、水平板の終端でのそれぞれの振幅の値にほぼ等しくなっている。これによると、水平板の長さが再帰距離のちょうど半分するとき2倍周波数の振幅 A_2 が最大となり、基本周波数の振幅 A_1 が逆に最小となる。この結果は、Mei⁹⁾が2成分波による非線型干渉問題の理論解析より推察したものとも一致する。

図-5(a), (b)は、それぞれ図-3(a)と図-4(a)に対応するケースにおける入射波高と周期により無次元化したバイスベクトルの場所的な変化を示している。井本らの研究¹⁰⁾によると、水深の大小にかかわらず位相関数 $\sigma_1 t - k_1 x$, $2\sigma_1 t - k_2 x$, $3\sigma_1 t - k_3 x$ をもつ自由波からなる水位変動のバイスベクトルは場所的な変化をしないが、これに波数が $\Delta k (= k_2 - 2k_1)$ だけ異なる成分波を加えた水位変動のバイスベクトルは場所的に変化するというを報告している。この結果を図-5に適用すると、水平板上の分裂波には波数が Δk だけ異なる成分波が存在するが、それが水深の深い海域を進行するときには自由波のみとなり各成分波が固有の位相速度で進行していることを示唆している。

3.2 水平板と不透過潜堤における波の反射と分裂効果 (1) 分裂効果の表示

上記の波分裂は、水平板上の浅水域を波が通過する間に、有限振幅波としての自由表面条件に拘束されてソリトン分裂を起こし、通過後に2倍、3倍周波数の自

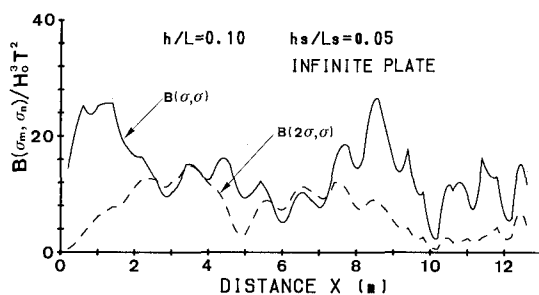


図-5(a) 無限長の水平板におけるバイスベクトルの分布

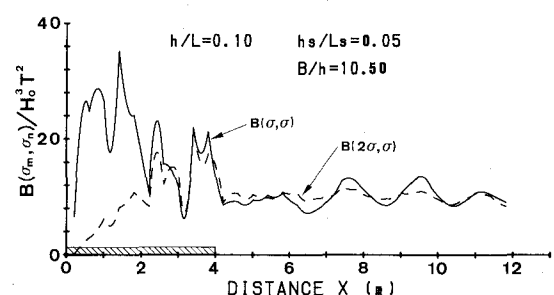


図-5(b) 有限長の水平板におけるバイスベクトルの分布

由波として独立に進行するものと解される。長周期の波を制御する観点からは、高周波数成分波の振幅を基本周波数のそれと同程度かそれ以上にすることが必要であり、分裂波の発生や成長に影響を及ぼすと思われる板上水深や板の長さ、水平板下の流体の運動等の影響について調べ、効率よく波を分裂させる必要がある。この場合、水平板を通過した後の波と反射する波を考え、その2種類の波における3倍周波数までの成分波が持つパワーつまりエネルギー輸送率 (energy flux) と入射波のenergy fluxとの比を次式で表す。

$$\left. \begin{aligned} T_{p_i} &= \{WP_{T_i}/WP_0\}^{1/2} \\ T_{pT} &= \left[\sum_{i=1}^3 WP_{T_i}/WP_0 \right]^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} R_{p_i} &= \{WP_{R_i}/WP_0\}^{1/2} \\ R_{pT} &= \left[\sum_{i=1}^3 WP_{R_i}/WP_0 \right]^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

ここに、 i は1から3までの整数をとり、 WP_{T_i} と WP_{R_i} はそれぞれ通過波と反射波の各成分波のパワーを、 WP_0 は入射波のパワーを表し、式(1)で得られる

振幅と各成分波の周波数に対応する群速度より求められる。また、 T_{p_i} と R_{p_i} は、いわゆる基本周波数成分波の通過率と反射率を意味しており、2倍および3倍周波数成分波のパワーと入射波のそれとの比は、単位時間に入射波の持つエネルギーがどれだけ通過波や反射波の高周波数成分波に輸送されるかを表し、各成分波の成長度を示す一つの重要な指標と考えられる。

図-6(a)と(b)は水平板に対する結果を、図-7(a)と(b)は矩形不透過潜堤に対する結果を示している。図中の実線は、井島ら¹¹⁾ が提案した境界要素法の線型計算による基本周波数の通過率と反射率を表している。水平板と矩形潜堤の違いは、基本周波数のパワー比すなわち通過率と反射率に顕著に現れている。水平板では、相対水深が $h/L=0.15$ ($B/L=0.3$) 付近で測定通過率が50%以下と最小値を示し、逆に反射率が最大値を示す。相対水深がそれよりも小さいところで通過率が急激に大きくなり、大きいところで通過率が緩やかに増大していく。一方、潜堤の場合は、通過率の測定値は相対水深にあまり係わりなく75%前後で変化している。しかし、2倍、3倍周波数成分のパワー比は、水平板と潜堤とも大きな差異はみられない。ただ、潜

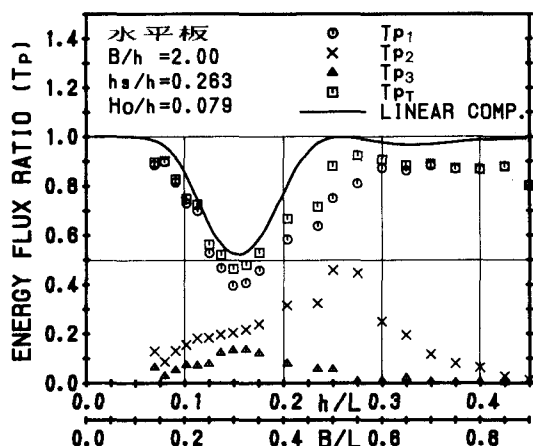


図-6(a) 水平板における通過波と入射波のパワー比

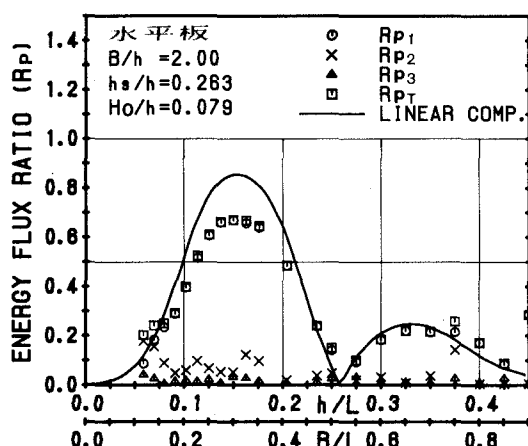


図-6(b) 水平板における反射波と入射波のパワー比

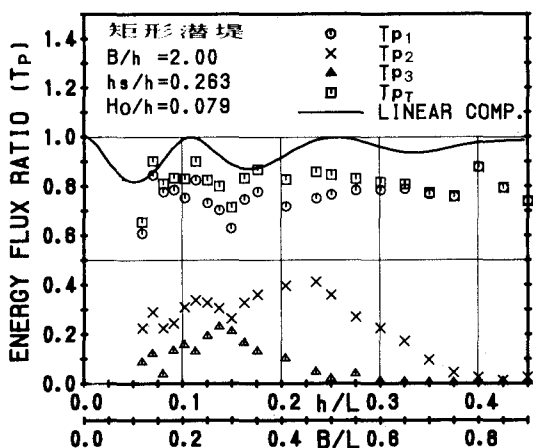


図-7(a) 矩形不透過潜堤における通過波と入射波のパワー比

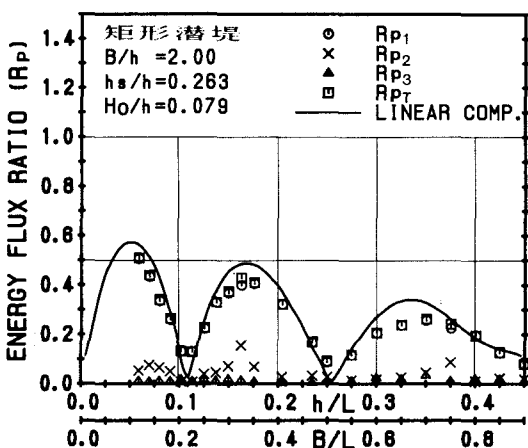


図-7(b) 矩形不透過潜堤における反射波と入射波のパワー比

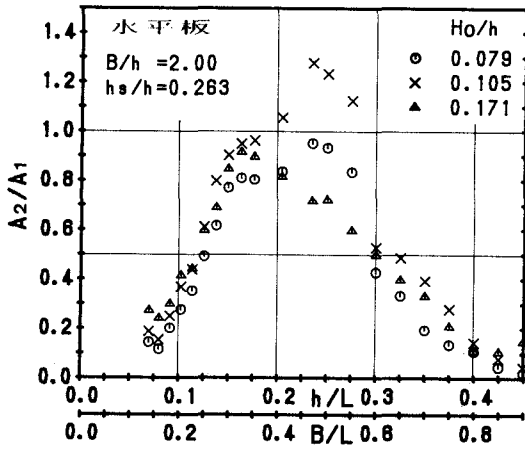


図-8 水平板における通過波の2倍周波数成分波と基本周波数成分波の振幅比

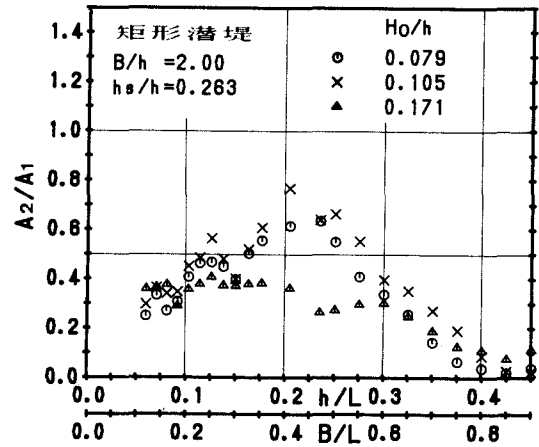


図-9 矩形不透過潜堤における通過波の2倍周波数成分波と基本周波数成分波の振幅比

堤の方が、波長の長いところで成分波の成長度がやや高い傾向にある。反射波における高周波成分波のパワー比は、両者とも小さく、成分波のエネルギーのほとんどが通過波側に伝達されることが分かる。これらのことは、後で示す水平板や潜堤の幅(B)が長い場合(図-10と11)でも同様のことが言える。

図-8と9は、それぞれ水平板と潜堤の通過波における基本周波数の振幅と2倍周波数のそれとの比(A_2/A_1)を表している。水平板の方が潜堤より相対水深 h/L の広い範囲で大きな値となり、 $B/L=0.3$ 近傍で $A_2/A_1 \approx 1$ と2倍周波数の振幅が基本周波数のそれと同程度の大きさになる。これは、前述したように、水平板による通過率が $B/L=0.3$ 付近で最小値を示すため A_1 が小さくなり、パワーとしては潜堤の方が大きい値であるにもかかわらず、 A_2 と A_1 の比としては、水平板の方が大きい値を示すことになる。これらの結果は、実用面を考えると、構造的に高価な不透過潜堤よりも安価な水平板の方が効果的に長波長の波を制御することができることを示している。

(2) 水平板の諸元の影響

図-10と11に平板の長さが水深の5.25倍の時のパワー比を示しており、図-8と7と比較すると分かるように、平板が長いほど相対水深の小さいところで高周波数成分波のパワーが最大値を示すとともに、それらの

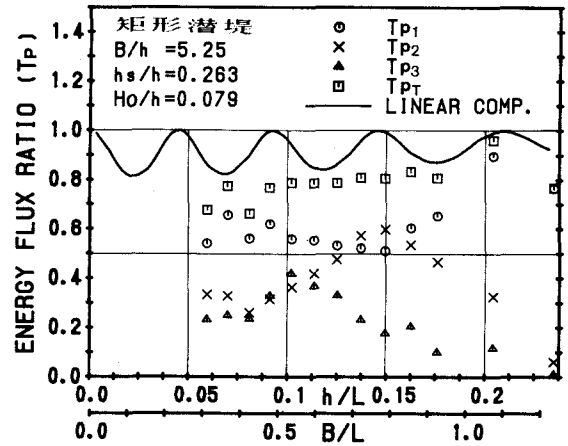


図-11 矩形不透過潜堤における通過波と入射波のパワー比($B/h=5.25$)

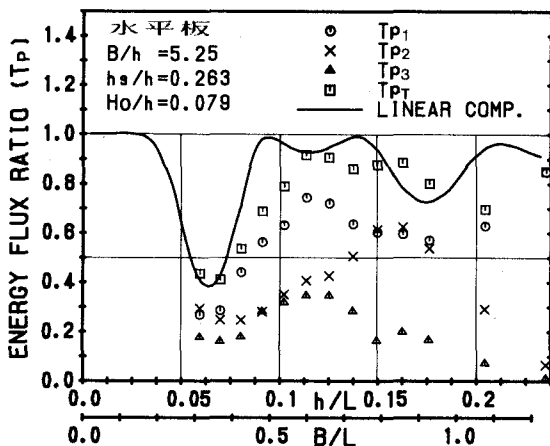


図-10 水平板における通過波と入射波のパワー比($B/h=5.25$)

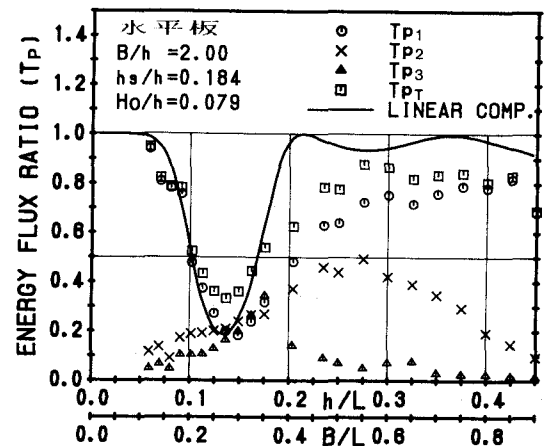


図-12 水平板における通過波と入射波のパワー比($h_s/h=0.184$)

成長度が全体的に高い。これは、図-3の各成分波の振幅の場所的分布を示す結果から、相対水深の小さい入射波ほど水平板上を進行する過程で成分波が成長するために、より長い距離が必要であり、このため、有限長の水平板では板が長いほど相対水深の小さいところで成分波のパワーが最大となるのである。

また、図-12に示すように、板上水深が小さくなると振幅・水深比の増大により非線型性が強まることから、2倍、3倍成分波の成長度が大きくなる。特に、2倍成分波の場合は、板上水深の変化によってパワーの最大値自体はあまり変わらないが、相対水深のひろい範囲で T_{p2} が50%に近い値をとり、相対水深の大きいところで成長度が高い。ところが、3倍成分波の場合は、最大値自体が急激に増大する傾向にあり、各成分波ごとに成長の様子が異なっていることが分かる。

4. まとめ

(1) 水深の深い海域を進行する規則波が水深の浅い没水水平板に入射するとき、それが微小振幅波であっても水深の急激な減少と自由表面条件の非線型性によって変形しソリトン分裂を起こす。そして、水平板上での碎波が起こると否にかかわらず水平板を通過した波が再び深い海域を進むとき、基本周波数の1, 2, 3倍等の周波数をもつ成分波に分裂し、各成分波がそれぞれの周波数に対応する位相速度で相互に作用することなく進行する。

(2) 波が有限な長さの水平板上を進行するときの各成分波の成長度は、反射波の影響により多少の変動を伴うが、無限長の水平板の場合と類似している。そして、水平板を通過した後の各成分波の振幅は、水平板の長さにより異なり、その終端におけるそれぞれの振幅の値にほぼ等しい。2倍以上の周波数の振幅が1倍のそれよりも大きくなると、水平板を通過した波の波長は入射波のそれよりも不規則に短縮されることになり、従って没水水平板は、入射波をその波長よりも短波長の有義波に変換する機能を持つことになる。

(3) 入射波を分裂させ基本周波数の2倍、3倍成分波を発生させることにに関して、水平板と不透透な矩形潜堤とでは大きな違いはみられないが、基本波に対する水平板の通過率が潜堤のそれよりも小さいので、通過波における2倍成分波と基本成分波の振幅比では水平板の方が大きく、実用上、水平板の方が有利となる。また水平板においては、波長の長い波に対しては板長を長くし、短い波に対しては板上水深を浅くすることにより入射波を効果的に分裂させることができる。

すなわち、水平板と潜堤を波の遮断機能上から比較すると、前者は入射波を波長に関して選択的に遮断する機能が顕著であるが、後者ではそれが余り顕著ではない。また、通過波に対する分裂機能については水平板が明らかに優れていると言うことができる。これらについては、数値解析によって次の機会にさらに明らかにしたい。また、実用上問題となる不規則波にお

る波の分裂現象等についても調べる予定である。

最後に、本研究の実施については、九州大学水工土木学科技官牛房幸光氏、大学院生の長野敦、東和大学工学部4年田中誠、中並龍人、原田雅敏の各君の真摯なる協力に負うところが多い。ここに感謝の意を表したい。なお、本研究の一部は、文部省科学研究費（奨励研究）の助成を受けたことを付記する。

参考文献：

- 1) 井島武士、尾崎重雄、江口泰彦、小林彰：水平板による防波堤と岸壁に関する理論的研究(2)、第17回海岸工学講演会論文集、1970、pp.97~106
- 2) 服部昌太郎、松本文信：水平板式透過性防波堤の水理特性、第24回海岸工学講演会論文集、1977、pp.266~270
- 3) 田淵幹修、木原力、滝川清、中島重旗：水平式防波堤の水理特性に関する研究、第34回海岸工学講演会論文集、1987、pp.482~486
- 4) 高木幹雄、川崎孝生：没水平板の消波効果に関する研究、第8回海洋工学シンポジウム、日本造船学会、1988、pp.259~266
- 5) Iijima, Takeshi, T. Uwatoko, Y. Ushifusa, H. Kojima, "Experiments on the Improvement of Wave Interception Effect of Sea-Balloon Breakwater," *Memoirs of the faculty of Engineering*, Vol.46, No.2, Kyushu Univ., 1986
- 6) 小島治幸、井島武士、長野敦：水平板による波の分裂に関する基礎的研究、昭和62年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集、1988
- 7) 小島治幸、井島武士、長野敦：水平板による波の分裂に関する実験的研究、九州大学工学集報、Vol.61 No.5, pp.615~622, 1988
- 8) 日野幹雄：スペクトル解析、朝倉書店、1977、pp.1~300
- 9) Mei, C. C., *The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves*, 1983, pp.1~740
- 10) 井本久仁吉、石田昭、細井正延：バイスペクトルの理解と2次波峰現象へのその応用、名古屋工業大学学報、第30巻、1978、pp.347~354
- 11) 井島武士、周宗仁：グリーンの公式による2次元水面波の境界値問題の解析、土木学会論文報告集、NO.252, pp.28~32, 1976