

空気防波堤に関する研究（第2報）

——潜堤との併用効果——

岩垣 雄一*・石田 啓**・本田 勉***・須藤 雄二****

1. ま え が き

昨年度に、この研究の第1報として、空気防波堤の基本的性質について調べた結果を発表した¹⁾。そこでは、エアバブルカーテンによって発生する表面水平流の最大流速は、従来の研究でいわれているように供給空気量の1/3 乗に比例して増加すること、したがって、空気量を増大させても水平流の流速はさほど増加せず、そのために空気防波堤単独では消波可能な波に限界があって、ある周波数以下の波にはまったく効果がないこと、そしてかえってエアバブルカーテン自身が発生する波によって波高が大きくなる場合もあること、などが見出された。このために、空気防波堤単独でなく、潜堤と併用することによって、より低周波数の波までも消波できるようにという目的で、複合タイプの防波堤を考案し、その成果を昨年度の自然災害科学総合シンポジウム講演会にて報告した²⁾。その報告では、空気防波堤と潜堤とをそれぞれ単独で用いた場合よりも、両者を併用することによって消波効果が増大することを発表した。実験が不十分で、かつ、なぜ併用した場合に消波効果が増大するのかが不明であった。

Snyder³⁾ は 1959 年、噴流防波堤と潜堤を併用したときの消波効果を調べる実験を行い、この複合タイプの防波堤の併用効果を見出した。彼の動機も、著者らと同様、噴流防波堤単独では大変効率が悪いという理由からで、自然の地形でも潜堤のようなリーフが存在するし、また満潮時には水没する防波堤もあるということから潜堤との併用実験を試みたものである。彼は、水深と波の周期を一定として、潜堤の高さと幅および噴流の設置位置を変え、波の減衰率と噴流流量との関係を調べ、潜堤を併用すると噴流の効率が增大するが、この程度の効率増大では、戦時の特別の場合以外は実用にならないであろうと否定的な結論を下している。彼の研究は、模型実験的に複合防波堤としての実用性を検討したという点

で、基礎的には多くの問題を残しているが、いわゆる簡易防波堤の性能向上を目的として、潜堤のような固定構造物との併用を試みたという点は評価されるべきであろう。

この研究は、空気防波堤に関する研究の第2報として、どのような潜堤を用いれば併用効果を高めることができるか、また、なぜ潜堤を用いると併用効果が増大するのか、といった問題を解明する目的で実験を実施したもので、以下にその結果を報告する。

2. 実験装置および実験方法

(1) 実験装置

実験装置は第1報で述べたものと全く同じで、図—1に示す長さ 27 m、幅 50 cm、深さ 70 cm の両面ガラス張りの実験水槽を用いた。

潜堤は、それを構成する物質による効果を比較するために、不透過性のものと透過性の潜堤を用い、前者については上面が滑面と粗面のもの、後者についてはステラシートと捨石を用いたものの合計4種を対象とした。不透過性潜堤は塩化ビニール製の箱で、中に鉄製の錘を入れて動かないようにした。また粗面は直径 10 mm のガラス棒を 30 mm 間隔で潜堤上面に貼り付けた。一方、透過性潜堤は、高さ 70 cm、幅 20 cm、長さ 47.5 cm（水槽幅方向）の鉄製枠に金網を張ったものを作り、これにステラシートあるいは捨石を入れて使用した。ステラシートは空隙率 98%、捨石は粒径が 30~60 mm の範囲に入るようふるい分けして用いた。その空隙率は 45% であった。潜堤高は、不透過性については 30, 35, 40 および 45 cm の4種類、透過性では 30, 35 および 40 cm の3種類である。潜堤幅は、不透過性で高さが 30 cm のもののみ、20, 40 および 60 cm と変えられるようにした。

(2) 実験方法

水深は 45 cm で一定とし、入射波は 4~6 cm 程度のほぼ同一波高で周波数 f が 0.4~1.6 Hz の範囲の規則波であって、最初に潜堤のみによる消波実験を行った。潜堤の設置位置は、図—1 に示すようにその前面が造波

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学教室

** 正会員 工修 金沢大学講師 工学部土木工学教室

*** 正会員 工修 (株)熊谷組

**** 京都大学大学院工学研究科

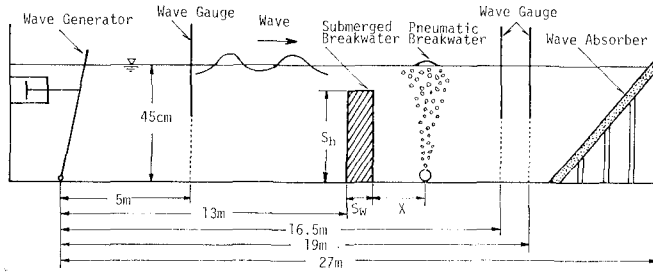


図-1 実験水槽模式図

板より 13m のところで、波高計は造波板より 5m と 19m 離れた位置を基準点とし、他に波高通過率の場所による変化を知る目的で、16.5m の位置にも設置した。

ついで、潜堤を通過した波の特性を明らかにするために、潜堤後面より 90cm および 140cm 離れた 2 点で水位変化をデータレコーダに収録し、位相スペクトルにより成分波の位相差を調べ、自由波と拘束波を識別する手がかりとした。また拘束波に対する空気防波堤の有効性、すなわち有限振幅波とみなされる波を入射波として、空気防波堤を通過させることにより、波形が正弦波に近くなるかどうかを調べる実験も行った。

さらに、空気防波堤と潜堤とを併用した消波実験を実施した。空気供給量は 300 l/min (補正前) で一定とした。この空気量は標準状態 (0°C, 1 気圧) 単位時間、単位長さ当りに補正すれば、 $Q_0 = 7.09 \text{ l/sec} \cdot \text{m}$ となる。気泡発生筒は 1 列とし、まず、空気防波堤と潜堤の最も有利な配置を決めるため、潜堤高 $S_h = 35 \text{ cm}$ 、幅 $S_w = 20 \text{ cm}$ の不透過滑面潜堤を用い、気泡発生筒を潜堤の岸側あるいは沖側に、それぞれ 0, 45, 90, 135 および 180cm 離して消波実験を行った。また同時に、ここには結果を報告していないがエアバブルカーテン流の水平流速を測定した。測定点は気泡発生筒より 45cm 離れた位置 (気泡発生筒を潜堤より 45cm 離れた場合の潜堤側への流速測定のみ 30cm 離れた位置) である。さらに、波が潜堤を越えたあとと水平流にどのような波が入射するかを知るために、各流速の測定点でも水位記録をデータレコーダに収録した。このようにして決定した有利な配置のもとで、潜堤を種々変えて、空気防波堤との併用消波実験を行った。なお、データレコーダに収録した水位記録は、読み取り間隔 0.08 sec で周波数分析を行い、波高スペクトルの変化を調べた。この実験の模式図を図-1 に示す。

3. 実験結果および考察

(1) 潜堤による消波効果

この研究の目的は併用効果を調べることにあるので、潜堤の消波効果は直接関係ないが、両者単独の消

波効果が明確でないと併用効果を抽出することができないため、ここでは取りあげた各種潜堤の波高通過率についての実験結果例を示す。

図-2 は不透過性潜堤で潜堤幅 $S_w = 20 \text{ cm}$ の場合に、潜堤高 S_h を変えたときの波高通過率 H_T/H_I (H_T : 通過波の波高, H_I : 入射波の波高) と、潜堤の構成物質を変えてステラシートと捨石を用いたときの波高通過率とを比較した一例である。同じ構成物質であれば、潜堤高が大きいほど波高通過率は小さく、また潜堤高が同じ場合には、不透過性で滑面、粗面、透過性である捨石、ステラシートの順に波高通過率が小さくなることがわかる。しかし、併用効果としては、波高通過率の小さい潜堤が有利であるかどうかは不明であって、むしろ次に述べる潜堤を越えた波の特性が入射波と比較してどのように変化したかが問題なのである。

(2) 潜堤を越えた波の特性

さきに岩垣・安井²⁾ は、空気防波堤と潜堤とを併用すると消波効果が高まるのは、潜堤を越えると波のエネルギーの一部が倍周波数成分波に移行し、それを空気防波堤が消波するためであると説明した。これが正しいとすれば、前述したように、単独で消波効果の最も高い潜堤が併用効果が最も著しいとは限らないで、波のエネルギーをより多く倍周波数成分波に移行させる潜堤の方が、たとえ波高通過率が大きくても、併用消波効果が十分期

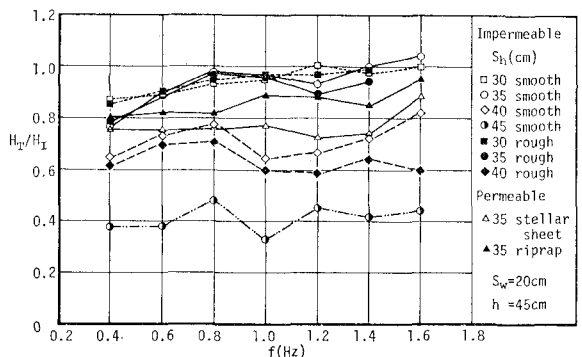


図-2 不透過性および透過性潜堤の波高通過率と入射波の周波数との関係

待できることになる。その意味で、ここでは潜堤を越えた波の特性について検討する。

図-3 は周波数 $f=0.4\text{ Hz}$ の入射波と潜堤を通過した波の波高スペクトルを比較したものである。潜堤は不透過性で滑面、堤高 $S_h=40\text{ cm}$ 、堤幅 $S_w=20\text{ cm}$ のものを使用した。波高スペクトルは本来線スペクトルであるが、図では比較のため各点を線で結んで示してある。この図より、入射波が潜堤を越えると、基本周波数成分波の波高が約 2 cm 減少しているのに対して、2倍周波数成分波の波高が約 0.6 cm 増加している。また3倍周波数成分波も2倍周波数波と同程度の波高増加を示し、さらにそれ以上の周波数成分波への移行も見られる。もちろん、反射とか砕波などによって逸散した部分もあるであろう。このような倍周波数成分へのエネルギー移行は、他の周波数 $f=0.8$ および 1.2 Hz の波でも存在することが実験によって見出された。この実験から周波数分析の上では倍周波数成分波が増加することがわかったが、その倍周波数成分波が拘束波か自由波かの判断がつかない。図-4 は $f=0.77\text{ Hz}$ の有限振幅波と考えられる入射波と、空気防波堤を通過した波の波高スペクトルを比較したものであるが、この図からわかるように、もし2倍周波数 $f=1.54\text{ Hz}$ の成分波が自由波であれば、空気防波堤によって消波できる周波数の波であるにもかかわらず、拘束波であるために全く消波していない。したがって、潜堤を越えた波の倍周波数成分波が、もし拘束波であれば岩垣・安井が指摘した併用効果は生じないことになる。そこで、潜堤を越えることによって発生した倍周波数成分の波が、自由波であるか拘束波であるかを知る必要がある。そのため、前述のように潜堤後面から 90 cm および 140 cm 離れた2点における水位の同時記録より位相スペクトルを算出し、2点間の位相差 $\Delta\theta$

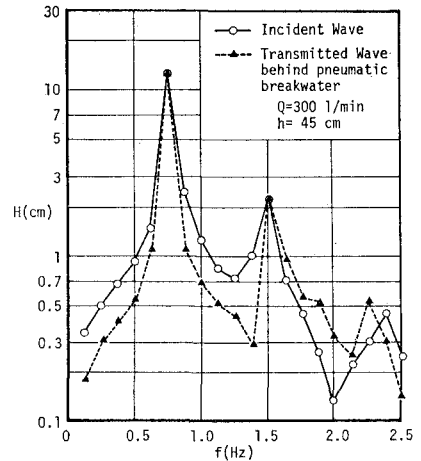


図-4 有限振幅の入射波と空気防波堤を通過した波の波高スペクトルの比較

を求めた。一方、2点間の距離を L 、成分波の波長を L_c とすれば、

$$\Delta\theta = 2\pi L/L_c \quad \dots\dots\dots (1)$$

であることから、 L_c がわかれば $\Delta\theta$ の理論値が求められるので、実験値と比較することができる。測定した波は周波数が $f=0.586\text{ Hz}$ および 0.781 Hz で、 L_c は微小振幅波理論から計算した。また拘束波の L_c は基本周波数成分波の波長の $1/2$ とした。実験に用いた潜堤は不透過性滑面、 $S_w=20\text{ cm}$ で、 $S_h=35\text{ cm}$ および 40 cm の2種である。表-1 は、このようにして得られた位相差の実験値と理論値の比較を示す。Case 5, 7, 8 はいずれも潜堤通過後の2倍周波数成分波であるが、自由波の理論値とよく一致している。したがって、潜堤を越えることによって発生した倍周波数成分波は自由波であるとみなしてよい。

(3) 空気防波堤と潜堤との有利な配置

岩垣・安井²⁾は潜堤から気泡発生筒までの距離を変えて、波高通過率が最小となる位置を探した結果、水深の2倍の距離だけ、潜堤の岸側の面から離して設置すればよいことを見出した。この結論を再確認するために同様な実験を行った。図-5 は入射波の周波数を高低2種類にとって、気泡発生筒の設置位置による波高通過率の変化を調べたものである。この場合、気泡発生筒が潜堤の沖側にある場合に、潜堤の側面からの距離 x を負とし、岸側にある場合を正として、水深との比 x/h により横軸をあらわしている。したがって、 x/h が -0 と $+0$ の間が潜堤の存在する部分である。この図から、 $f=0.6\text{ Hz}$ の波の場合には $x/h \geq 2$ のとき、 $f=1.2\text{ Hz}$ の場合は $x/h = -0$ のところと、 $x/h \geq 2$ のときが消波効果が大きいことがわかる。両者を総合すれば、やはり最も有利な配置は気泡発生筒を潜堤の岸側に、水深の2倍以上

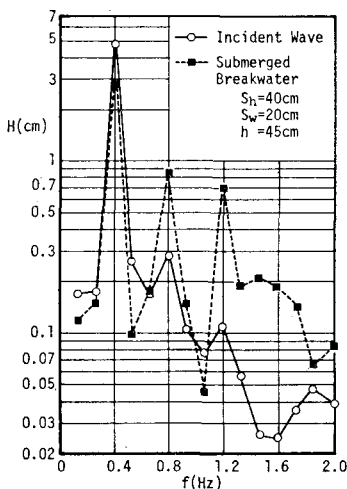


図-3 入射波と潜堤を越えた波の波高スペクトルの比較

表-1 各成分波の位相差

Case	f (Hz)	Wave	Freq. Compo.	S_h (m)	Experimental $\Delta\theta$ (rad)	Theoretical $\Delta\theta$ (rad)	
						Free Wave	Bound Wave
1	0.586	Transmitted	fundamental	0.35	1.04	0.985	—
2	0.781	Incident	fundamental	—	1.46	1.44	—
3	0.781	Transmitted	fundamental	0.35	1.50	1.44	—
4	0.781	Transmitted	fundamental	0.40	1.43	1.44	—
5	1.17	Transmitted	double	0.35	2.94	2.83	1.97
6	1.56	Incident	double	—	2.94	4.89	2.87
7	1.56	Transmitted	double	0.35	4.91	4.89	2.87
8	1.56	Transmitted	double	0.40	4.78	4.89	2.87

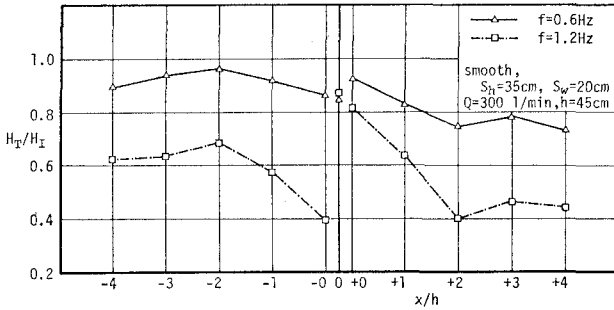


図-5 気泡発生筒の設置位置による波高通過率の変化

一テン流の大部分が潜堤のない方向，すなわち x の負の方向に向うため，水平流速が増大することによるのである。

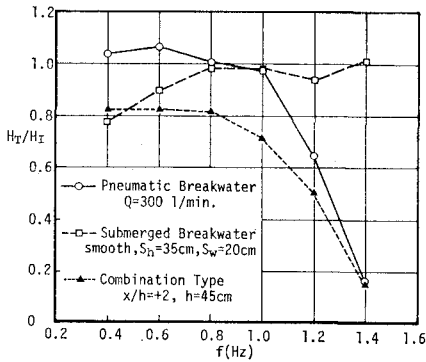
以上のことから，以下の実験では，気泡発生筒の設置位置は $x/h=2$ とした。

(4) 空気防波堤と潜堤との併用による消波効果

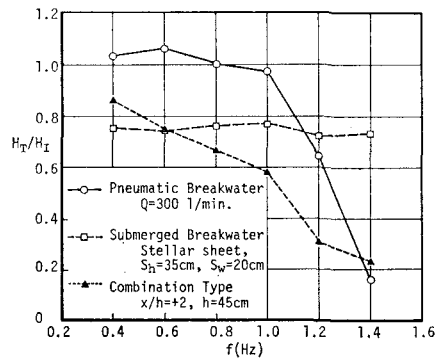
潜堤の寸法および構成物質を変えて空気防波堤との併用消波実験を行った。そのうちの若干例について実験結果を示したのが 図-6 である。

離した場合であるといえよう。 $x/h=-0$ のときに波がよく消えるのは，潜堤が壁の働きをして，エアバブルカ

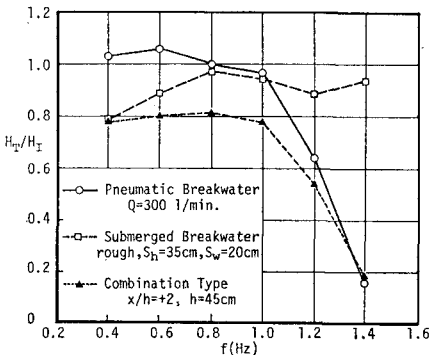
る。この図は，特に堤高 $S_h=35$ cm，堤幅 $S_w=20$ cm の4種類の潜堤の場合を取り出したもので，両者を併用



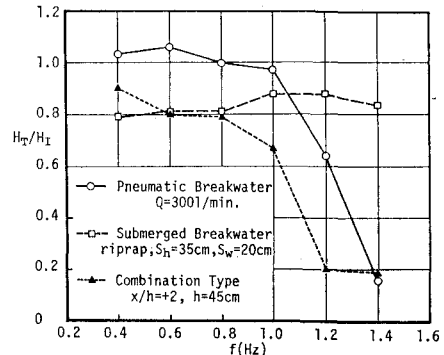
(a) 不透過性，滑面の場合



(c) ステラシートの場合



(b) 不透過性，粗面の場合



(d) 捨石の場合

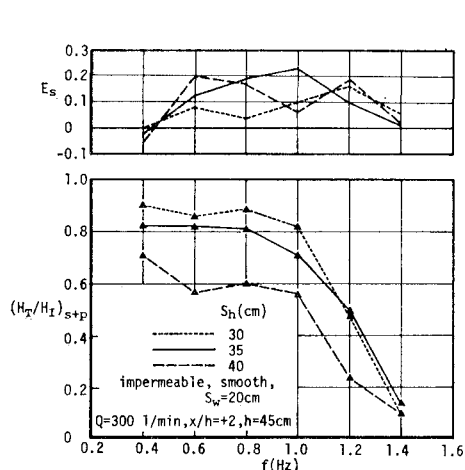
図-6 空気防波堤および潜堤を単独で用いた場合と併用した場合の波高通過率

することによって、空気防波堤のみでは消波できない低周波数領域の波をもある程度消波し、周波数全体にわたって波高通過率が減少するという効果のほかに、(c) のステラシートの場合のように周波数の増大に伴う波高通過率の減少を緩やかにする効果や、(d) の捨石のように波高通過率曲線を低周波数側へ移動させ、消波限界周波数を小さくする効果もあることが見出される。しかし、この曲線を見るのみでは、果して両者併用による消波効果があるのかどうか判断しかねるので、次のように併用効果を定義する。

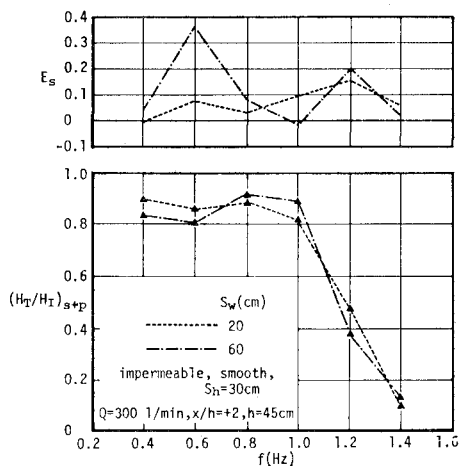
$$E_s = \left(\frac{H_T}{H_I} \right)_s \left(\frac{H_T}{H_I} \right)_P - \left(\frac{H_T}{H_I} \right)_{s+P} \quad \dots\dots\dots (2)$$

すなわち、潜堤と空気防波堤の単独での波高通過率をそれぞれ $(H_T/H_I)_s$ および $(H_T/H_I)_P$ とし、もし現象が線形であるとするれば、両者を併用した場合に $(H_T/H_I)_{s+P}$ という波高通過率が期待できることになるので、これと実際の併用した複合タイプ防波堤の波高通過率 $(H_T/H_I)_{s+P}$ との差 E_s をもって、併用効果と見なそうとするわけである。

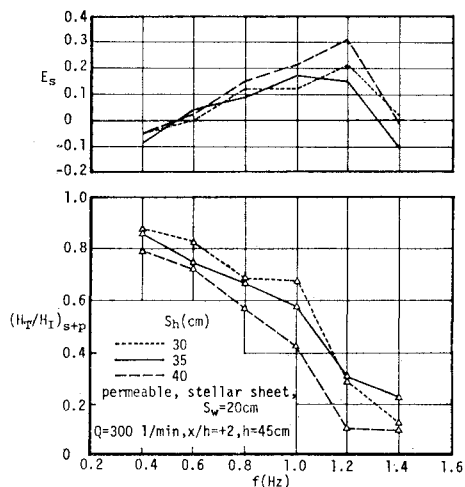
図-7 は複合タイプの防波堤の波高通過率および併用効果と入射波の周波数との関係を示したもので、(a) は不透過性で滑面、(b) は透過性のステラシートのいずれも幅 $S_w=20$ cm の潜堤で堤高を変えた場合の比較、(c) は不透過性滑面の高さ $S_h=35$ cm の潜堤で、堤幅を変えた場合の比較、(d) は $S_h=35$ cm, $S_w=20$ cm の潜堤で、構成物質を変えた場合の比較である。(a) と (b) から、一般に潜堤が高いほど消波効果も併用効果も著しいが、 $S_h=30$ cm と 35 cm ではほとんど差がないことが見出される。また潜堤の幅の効果は、(c) ではあまり見られないが、併用効果において $S_w=60$ cm の場合に



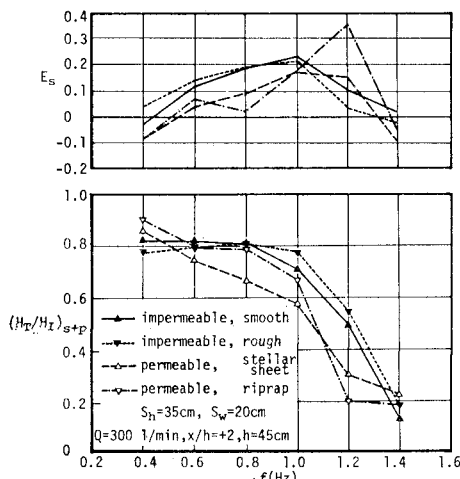
(a) 堤高を変えた場合の比較 (不透過性、滑面)



(c) 堤幅を変えた場合の比較 (不透過性、滑面)



(b) 堤高を変えた場合の比較 (ステラシート)



(d) 潜堤の構成物質を変えた場合の比較

図-7 複合タイプ防波堤の波高通過率および併用効果と入射波の周波数との関係

$f=0.6\text{ Hz}$ に高いピークをもつことが特徴づけられる。これは潜堤単独では1を越える大きな通過率であるにもかかわらず、空気防波堤によって0.8程度まで減らせたことによるものであり、これはむしろ潜堤幅と倍周波数成分波へのエネルギー移行との関係に問題があるものと考えられる。構成物質を変えた(d)に示す比較では、全般的にステラシートの潜堤が最も消波効果が大であるが、併用効果の方はむしろ不透過性潜堤が大きい。しかし、捨石の場合には $f=1.2\text{ Hz}$ のところにピークがあり、ステラシートも含めて、透過性潜堤は低周波数領域の入射波に対して、併用効果が小さいようである。また、いずれの場合も、併用効果があるのは $f\approx 0.5\sim 1.3\text{ Hz}$ の間であって、 $f\leq 0.5\text{ Hz}$ の入射波は、その2倍周波数でも 1.0 Hz 以下となつて、空気防波堤では消波できない領域であることから、併用効果が見られないことが説明される。一方、 $f\geq 1.3\text{ Hz}$ の場合は、空気防波堤のみで十分消波できるので、潜堤単独で高周波数領域の波までも有効な透過性潜堤の場合には、むしろ併用効果は負となる。

4. あとがき

以上、この論文では空気防波堤の研究の第2報として、その消波性能を向上させるために考案した潜堤との複合タイプの防波堤を取りあげ、実験によってその併用効果と、その効果があらわれる理由を詳細に検討した。その結果の概要を述べると次の通りである。

(1) 空気防波堤と潜堤との複合タイプ防波堤は、それぞれ単独の消波効果より大きい消波性能をもつことがわかった。その理由は、潜堤によって波のエネルギーの

一部が倍周波数成分波に移行し、それを空気防波堤が消波するからであつて、潜堤を越えた波の特性を調べることによって実証された。

(2) 潜堤として、不透過性の滑面および粗面のもの、透過性のステラシートおよび捨石を用いたものについて、空気防波堤との併用消波効果を比較した結果、消波性能については、ステラシートのような内部でのエネルギー逸散の著しい物質を用いた透過性潜堤の方が大きい、併用効果については、むしろ不透過性潜堤の方が大きいことが見出された。

(3) したがつて、低周波数の波をも消波できる空気防波堤と潜堤の複合タイプ防波堤の性能を向上させるためには、潜堤単独での消波能力が大きいことはもちろん好ましいが、同時に潜堤を越えた波のエネルギーが倍周波数成分の波へ大部分移行するような潜堤を見出すことが必要である。

なお、この研究は文部省自然災害特別研究費による研究の一部であることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 岩垣雄一・安井誠人： 空気防波堤に関する研究（第1報）—空気防波堤の基本的性質—，第22回海岸工学講演会論文集，pp. 563~569，昭50.11.
- 2) 岩垣雄一・安井誠人： 空気防波堤と潜堤との併用効果について，第12回自然災害科学総合シンポジウム講演会論文集，pp.433~434，昭50.10.
- 3) Snyder, C.M.: Model study of a hydraulic breakwater over a reef, Proc. ASCE, Vol. 85, No. WW 1, pp. 41~68, March 1959.

訂 正： 岩垣雄一・安井誠人：空気防波堤に関する研究（第1報）—空気防波堤の基本的性質—，第22回海岸工学講演会論文集，昭50.11 を次のように訂正する。

頁	箇 所	誤	正	頁	箇 所	誤	正
565	右下 17 行	(2.09)	(1.71)	567	図—7	Authors の実験値の縦軸の値を $h=45\text{ cm}$ のとき、 $0.938\sim 1.10$ に、 $h=60\text{ cm}$ のとき、 $0.901\sim 1.11$ に訂正	
〃	〃	(3.73)	(2.80)				
〃	〃	(5.71)	(4.08)				
〃	〃	(8.38)	(5.80)				
〃	〃	(11.6)	(7.71)				
〃	右下 16 行	(17.0)	(10.9)	〃	図—8 横軸の値	2.00	1.74
〃	〃	(23.5)	(12.6)			3.73	2.96
〃	〃	(33.3)	(15.5)			8.95	5.81
〃	〃	(64.6)	(20.1)			19.1	9.51
566	図—6	実験値の横軸の値を上記のように訂正				42.1	14.8
						93.3	22.1