

透過性防波堤の波高伝達率に関する実験的研究

岩崎 敏夫*・沼田 淳**

1. 緒 言

異形ブロックを使用した透過性防波堤は、施工の容易さ、施工段階での災害の防止、工期の縮小などの理由から、地方港湾などで使用される例が少なくない。しかし、この種透過性防波堤の波高伝達率に関する従来の研究は数少ないように思われる。本研究は、無堤時の砕波点より沖側に設置した透過性防波堤（全断面異形ブロック）の波高伝達率および消散エネルギーについての一般的な性質を明らかにする目的で行なったものである。

2. 実験装置および実験方法

(1) 実験装置

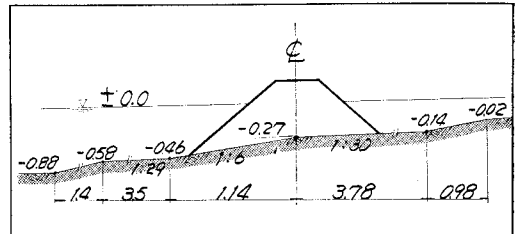
実験に使用した水路は、長さ 46.0 m、幅 1.0 m、深さ 1.5 m の二次元造波水路で、一端にフラップ型造波機を備えたものである。他端には、図-1 に示した海底地形を表面モルタル仕上げして製作し、その上に異形ブロックを使用した透過性防波堤を設置した。

波高測定は、階段抵抗式波高計（沖波および透過波）および抵抗線式波高計（透過波）を用い、それぞれペン書きオシログラフおよび自動平衡型記録計により記録した。

(2) 実験方法

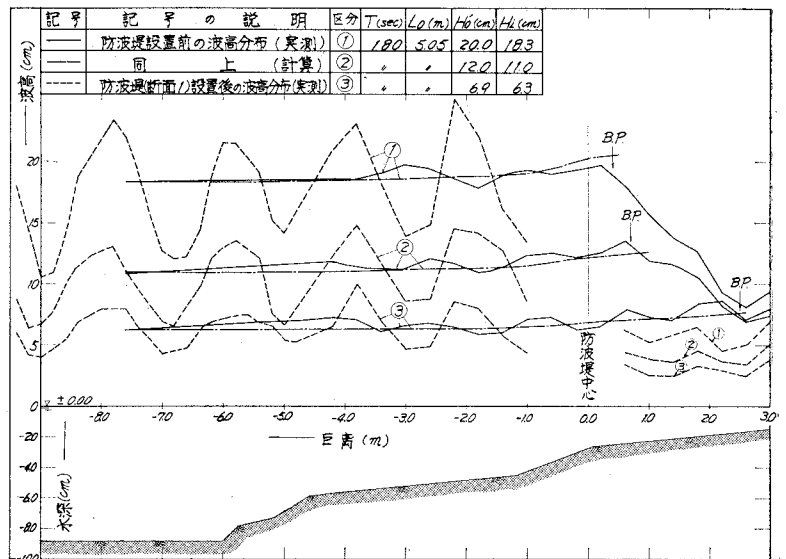
実験は初め、防波堤を設置しない自然海浜の状態で 20~40 cm 間隔で、防波堤沖側へ約 9.0 m、陸側へ 3.0 m の範囲について波高測定を行ない、起波後 6 波目から 10 波目までの 5 波の平均波高をもってその地点の波高とした。また、記録紙の波形から周期を読みとり、波速はストップウォッチを用いて測定した。つぎに、防波堤断面を設置して同様の測定を行なった。図-2 はこのようにして測定した実験結果の一例を示したものである。図中の一点鎖線は

図-1 実験断面



自然海浜の場合、微小振幅波理論により計算される波高変化の模様を示したものである。この場合の実測値（図中の実線）には、いくぶん反射波の影響も認められるが、平均的には計算値とほぼ一致している。また、図中の点線は、防波堤設置後の波高分布の模様を示したもので、この場合には反射波の影響が明瞭である。そこでこの場合の入射波高を Healy の方法で求め、前述の無堤時の場合の一樣水深部（防波堤中心から 7.6 m 沖側の位置）の波高と比較してみた所、後者の方が幾分大きくなる傾向はあるが、測定間隔の粗さ、海底地形の影響などによる誤差も考えられるので、次節の解析では後者の

図-2 実験結果の一例



* 正会員 工博 東北大学教授 工学部

** 正会員 東北大学助教授 同

表—1 実 験 条 件

		静水面の高 天端 h_c (cm)	水面における 堤体幅 B (cm)	堤体前面趾 端水深 h_i (cm)	堤体背面趾 端水深 h_t (cm)	ブ ロ ッ ク 個 数
実験断面	1.	16	77.6	42.6	22.2	420
	2.	9.6	60.4	41.4	22.4	313
	3.	6.0	50.8	39.9	22.4	202
波 の 諸 元	周 期 (sec)	入 射 波		相 当 沖 波		
		波長 L_i (m)	波高 H_i (cm)	波長 L_o' (m)	波高 H_o' (cm)	
	1.8	3.8	18.3	5.05	20	
		〃	11.0	〃	12	
		〃	6.3	〃	6.9	
	2.45	5.3	18.5	9.36	19.7	
		〃	12.0	〃	12.8	
		〃	8.4	〃	9.0	

一様水深部での実測波高を入射波の波高 H_i とすることにした。なお、図中の B.P. なる記号は、目視による砕波点の位置を示したものである。一方、1 台の波高計を一様水深部の一点に固定し、他の波高計を漸次岸側に移動しながら 2 台の波高計によって同時波形を記録させ、これらの波形記録から波の位相が一致する位置を求め、その距離をもって入射波の波長 L_i としたが (防波堤中心より 2.0~7.0 m 沖合での波長を示す)、このようにして得られた波長は、防波堤を設置したときに生ずる腹・節の位置から求められる波長、あるいは波速・周期の測定値から求められる波長とほぼ一致した。このようにして求めた入射波の諸元および実験に用いた防波堤の諸元を一覧にすれば、表—1 のとおりである。

3. 実験結果および考察

(1) 波高伝達率について

波高伝達率 (H_t/H_i) は、一般には次式のような無次元数の関数と考えることができる。

$$H_t/H_i = f(h_c/H_i, h_i/L_i, H_i/L_i, h_t/h_i, B/L_i) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

H_i : 入射波の波高, H_t : 伝達波の波高,

B : 水面における堤体幅, h_i : 堤体前面趾端の水深, h_t : 堤体背面趾端の水深,

L_i : 入射波の波長, h_c : 静水面からの天端高

今回の実験ケースについて、これら無次元数の値を一覧にすれば 表—2 のとおりである。ただし、伝達波高 H_t は、海底地形、反射波の影響などのため、測定点によって若干の差異があるので、港内側全測定値の平均値をもって代表させることとした。これら無次元数のうち、 h_t/h_i の値は、今回の実験では、防波堤の位置および水位を一定にしているためほぼ一定と見なすことができる。その他の無次元量の相対的な重要性を把握するため、 h_i/L_i , B/L_i がほぼ同一な値に対して H_i/L_i あるいは h_c/H_i をパラメーターとして、 h_c/H_i あるいは

H_i/L_i と H_t/H_i の関係を図示したのが 図—3, 4 である。今回の実験では h_i/L_i , B/L_i の変化範囲が狭く、これらの要素が波高伝達率におよぼす影響は明瞭でないが、これらの図から、波形勾配 (H_i/L_i) の大きい波ほど、また、相対天端高 (h_c/H_i) が大きいほど、波高伝達率 (H_t/H_i) は小さくなる傾向が明瞭であり、異形ブロックを使用した透過性防波堤の場合、波形勾配および相対天端高が波高伝達率に対して重要な要素となることがわかる。

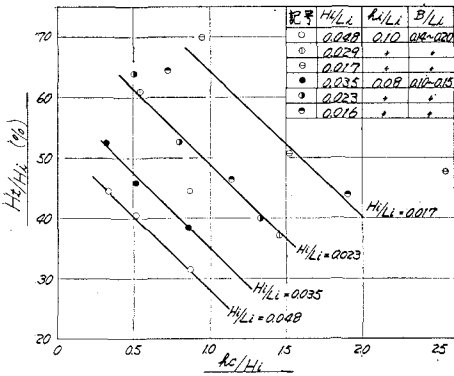
Johnson・Fuchs・Morison¹⁾ の矩形潜堤に関する研究、細井・富永²⁾ の離岸堤に関する研究では、天端が高くなると波形勾配の影響はほとんどなくなるとされており、近藤・佐藤³⁾ および合田・竹田⁴⁾ の直立壁および混成堤に関する実験的研究でも、波高伝達率は h_c/H_i によってほぼ一義的に定まり、波の諸元にあまり影響されないという結果が得られている。したがって異形ブロックを使用した透過性防波堤の場合、波形勾配も波高伝達率を左右する重要な一要素となるという点が、不透過な直立壁の場合と相違する特徴であると考えて良いであろう。

このことは、透過性防波堤の消波機構が、のり面での強制砕波および波による振動流が防波堤内の空げきを通るときの粘性摩擦あるいは渦によるエネルギー損失によると考えれば、ある程度予測しうることである。すなわち、今回の実験は、防波堤の位置が砕波点よりいくぶん

表—2 実験値の無次元表示

T (sec)	L_i (m)	H_i (cm)	諸 元 実 験 断 面			H_i/L_i			h_c/H_i			h_i/L_i			B/L_i			h_t/h_i			H_t (cm)			H_t/H_i (%)		
			共 通	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
1.8	3.8	18.3	0.048	0.87	0.52	0.33	0.112	0.109	0.105	0.202	0.160	0.135	0.52	0.54	0.56	5.79	7.41	8.16	31.6	40.5	44.6					
		11.0	0.029	1.45	0.87	0.55	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	4.09	4.86	6.71	37.2	44.2	61.0				
		6.3	0.017	2.54	1.52	0.95	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	3.03	3.18	4.40	48.1	50.5	69.8				
2.45	5.3	18.5	0.035	0.86	0.52	0.32	0.08	0.078	0.075	0.145	0.115	0.097	"	"	"	7.10	8.55	9.74	38.4	46.2	52.6					
		12.0	0.023	1.33	0.80	0.50	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	4.77	6.33	7.67	39.8	52.7	64.0				
		8.4	0.016	1.90	1.14	0.71	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	3.68	3.90	5.40	43.8	46.4	64.3				

図-3 h_c/H_i と H_i/H_i の関係



沖側にある場合であり、この範囲内では、波形勾配が大きいほどの面砕波を起こしやすく、また、波形勾配が増加するにつれて水粒子の速度が増加して粘性摩擦あるいは渦によるエネルギー損失が増加し、結局波高伝達率を減少させる結果になるものと思われる。

図-5 は、図-4 と同じものを実験断面によって記号を区別して表現し直したものであるが、特定断面に対する波高伝達率は、主として波形勾配によって左右されるように思われる。

図-4 H_i/L_i と H_i/H_i の関係

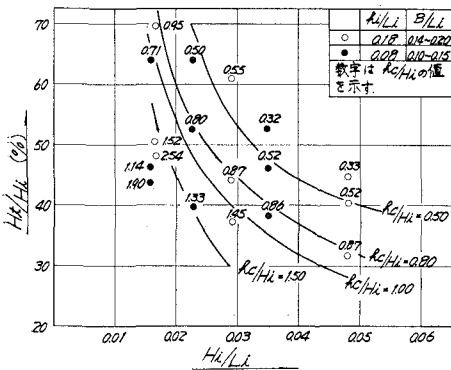
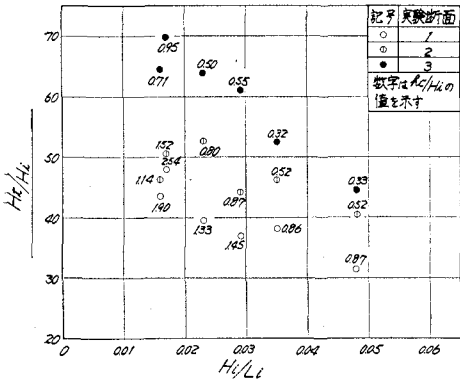


図-5 H_i/L_i と H_i/H_i の関係



従来の伝達波高に対する理論的研究⁵⁾の大部分は、微小振幅波理論に基づいているため、これらの理論式では、波形勾配の影響を明らかにすることができないが、合田⁶⁾は、造波装置の前面フィルターとして目の細かな金網を数 10 枚立て並べた場合の波高伝達率を次式のように表わしている。

$$\frac{H_i}{H_i} = \frac{1}{\left[1 + \alpha m \frac{D}{S} \left(\frac{H_i}{L_i}\right)^{\beta-1/\beta}\right]} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

D : 金網の線の太さ、 S : 線の中心間隔、 m : 金網の枚数、 α : d/L_i や $\sigma DL_i/\nu$, C_D などに関係する量、 β : $C_D \sim R_e$ の勾配に關係して 0.5~1.0 の値をとる。

としている。

いま、式(2)が今回の透過性防波堤にも適用できるものと仮定し、 $\beta=0.5$, $K=\alpha m D/S$ とおいて、今回の実験値をあてはめて K の値を逆算し、横軸に h_c/H_i 、縦軸に K の値をとって図示してみたのが 図-6 である。 K の値は、断面形状、空けき率、ブロックの大きさ、表面の粗度、Reynolds 数などに關係する量と考えられるが、この図によると、今回の実験範囲内では h_c/H_i が 1.0 より大きければ K の値は、ほぼ一定値になると考えて良いように思われる。したがって、この場合の伝達波高は、波形勾配のみの関数と考えて差し支えないであろう。しかし、 h_c/H_i が 1.0 より小さい場合の K の値は、バラツキがかなり大きく h_c/H_i のみによって一義的に關係づけることはできないようである。そこで、 $h_c/H_i < 1.0$ の場合について、Reynolds 数を次式のように定義し、Reynolds 数と K の關係を調べてみた。結果は 図-7 である。

図-6 h_c/H_i と K の関係

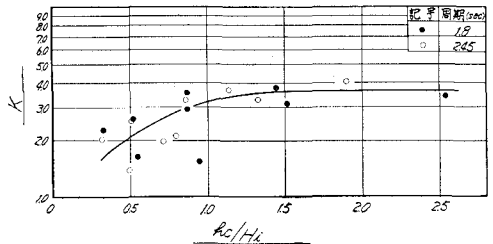
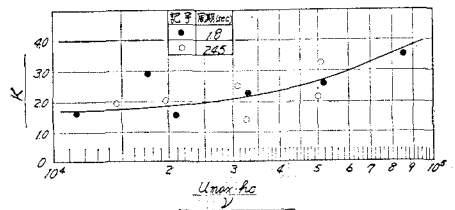


図-7 $\frac{U_{max} h_c}{\nu}$ と K の関係
(ただし $h_c/H_i < 1.0$ の場合)



$$R_e = \frac{u_{max} \cdot h_c}{\nu} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、

u_{max} : 静水面における水粒子の最大水平速度
(cm/sec), ν : 水の動粘性係数=1.01×
10⁻²(cm²/sec)

また、式 (3) の u_{max} は次式によって計算した。

$$u_{max} = \frac{\pi H_i}{T} \frac{\cosh 2 \pi h_i / L_i}{\sinh 2 \pi h_i / L_i} \dots\dots\dots (4)$$

この図から、Reynolds 数が大きくなるにつれて K の値が大きくなり、波高伝達率は小さくなることがわかる。また、かなりの点のバラツキはあるが、今回の実験範囲内では $h_c/H_i < 1.0$ の場合、 K の値は式 (3) で表わされる Reynolds 数の関数と考えることができるように思われる。

以上の考察から、今回実験の対象とした透過性防波堤の波高伝達率は次式のような形で表わしうのではないかと考えられる。

$$\frac{H_t}{H_i} = \frac{1}{\left[1 + K \left(\frac{H_i}{L_i} \right)^\beta \right]^{1/\beta}} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、

$\beta = 0.5$

K = 定数、ただし、 $h_c/H_i > 1.0$

(今回の実験では 3.0~4.0).....(6)

= $\phi(R_e)$ 、ただし、 $h_c/H_i < 1.0$

(今回の実験では 図-7 のごとし)

.....(7)

図-8 は計算結果の一例を示したもので計算値に近似する実験データも併記した。また、図-9 は第一港湾建設局新潟調査設計事務所が水平床で行なった透過性防波堤の波高伝達率に関する実験結果を $h_c/H_i > 1.1$ の場合と $h_c/H_i \leq 1.1$ の場合とに区別して、 H_i/L_i と H_t/H_i の関係に整理し直して見たものであるが、 $h_c/H_i > 1.1$ の場合、かなりの点のバラツキはあるが、 H_i/L_i は H_i/L_i のみの関数と考えると差し支えないようであり、

図-8 計算結果の一例

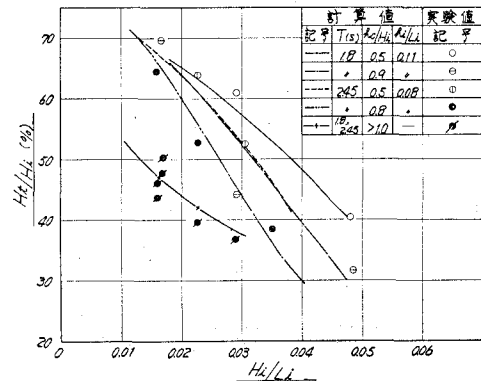
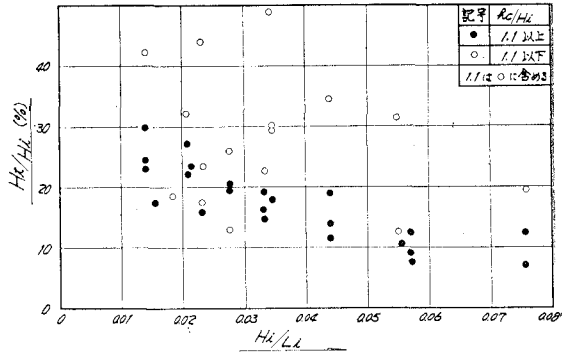


図-9 H_i/L_i と H_t/H_i の関係
(一建新潟調査設計事務所の実験値より)

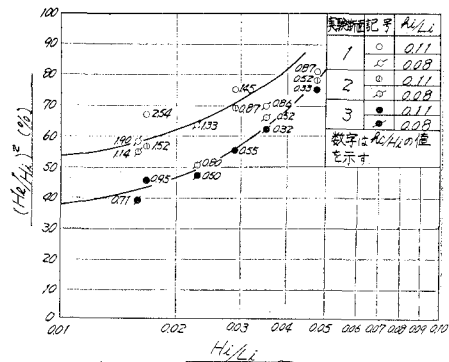


定性的にはわれわれの考察した結果と一致している。

(2) エネルギーの消散率について

図-10 は、今回の実験結果から Healy の方法によって求めた反射波高 H_r を使って、次式により防波堤上およびその内部で消散されるエネルギーの入射波エネルギーに対する比 $(H_i/H_i)^2$ を求め、これと波形勾配との関係を図示したものである。

図-10 H_i/L_i と $(H_i/H_i)^2$ の関係



$$\left(\frac{H_t}{H_i} \right)^2 = 1 - \left\{ \left(\frac{H_r}{H_i} \right)^2 + \left(\frac{H_i}{H_i} \right)^2 \right\} \dots\dots\dots (8)$$

同図によると、消散エネルギーは波形勾配が増加するにつれて大きくなるが、波形勾配のほか、 h_i/L_i 、 h_c/H_i なども消散エネルギーを左右する一要素と考えられる。すなわち、波形勾配が同じ場合 h_i/L_i が大きいほど、また、 h_c/H_i が大きいほど消散エネルギーが大きくなるようである。しかし、 h_c/H_i を 1 より大きい場合と小さい場合とに分けて考えると、消散エネルギーはごく大ざっぱにみて波形勾配のみの関数と考えると良いように思われる。図中の実線は、今回の実験値を $h_c/H_i > 1$ の場合と $h_c/H_i < 1$ の場合に分け、測定値を次式によって近似させた曲線である。

$$(H_i/H_i)^2 = [0.675 + 5.7(H_i/L_i)]^2$$

ただし、 $h_c/H_i > 1$(9)

$$(H_i/H_i)^2 = [0.54 + 7.33(H_i/L_i)]^2$$

ただし, $h_c/H_i < 1$(10)

$h_c/H_i < 1.0$ の場合, 前述したように, 伝達波高は, Reynolds 数に左右されるという点を考慮すれば, 式(10)も当然 Reynolds 数に影響されるであろうと予測されるが, エネルギーは波高の2乗に比例するという関係から Reynolds 数の影響を無視しうる結果になったものと考えられる。

4. 結 論

この実験を通して異形ブロックを使用した透過性防波堤を無堤時の破砕点より沖側に設置した場合の波高伝達率および消散エネルギーについての一般的な性質としてつぎの諸点を指摘することができる。

(1) 異形ブロックを使用した透過性防波堤の波高伝達率は $h_c/H_i > 1.0$ の場合と $h_c/H_i < 1.0$ の場合とに区別して考えることができる。

(2) 前者の場合の伝達波高は, 式(5), (6)のように, 波形勾配によって一義的に関係づけることができるが, 後者の場合のそれは, 波形勾配のみならず, 式(3)で定義した Reynolds 数も重要な要素であると考えられる。したがってこの場合には, 模型実験の相似性が問題点として指摘される。このような模型実験の相似性に関する研究としては J.W. Johnson, H. Kondo, R. Wallihan⁷⁾ の実験的研究があるが, さらに詳細な研究が必要と思われる。

(3) 防波堤上あるいは防波堤内で消散されるエネルギーは, 波形勾配のほかに, 水深・波長比, 相対天端高などにも影響されるようであるが, これも波高伝達率の場合と同様 $h_c/H_i > 1.0$ の場合と $h_c/H_i < 1.0$ の場合に大別すると, それぞれ波形勾配のみの関数として, 式

(9), (10) のような形で表わされると思われるが, この点については, さらに実験データの集積が必要であろう。

以上は, 規則波による実験結果から, 透過波および反射波の波高変化に着目して考察した結果であるが, 現地波への適用を考える場合には, 堀川・小森⁹⁾ が行なっているように, エネルギー スペクトルによるさらに厳密な検討が必要であろうと思われる。

最後に, 本実験を遂行するに当たって, 主として実験を担当された東北大学職員 佐藤弘君 および熱心なご協力をたまわった宮城県土木部港湾課および宮城県石巻港湾事務所の関係各位に深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Johnson, J.W., R.A. Fuchs, and J.R. Morison; The damping action of submerged breakwaters, Trans. Amer. Geophys. Union, 32, 5 (October, 1951), 704-718.
- 2) 細井正延・富永正昭: 離岸堤による波高減衰について, 第6回海岸工学講演会講演集, p. 121~123, 1959.
- 3) 近藤徹郎・佐藤 功: 防波堤天端高に関する研究, 北海道開発局土木試験所月報第117号, p. 63~66, 1965.
- 4) 合田良実・竹田英章: 越波による防波堤背後への波高伝達率, 第13回海岸工学講演会講演集, p. 87~92, 1966.
- 5) Wiegel, R.L., : Oceanographical Engineering, August, 1965.
- 6) 合田良実: 波浪に関する模型実験の最近の手法について, 第18回運輸省直轄港湾技術研究会資料, 昭和42年10月, p. 16~19.
- 7) J.W. Johnson, H. Kondo, and R. Wallihan: Scale effects in wave action through porous structures, The Tenth conference on Coastal Engineering Sep. 5-8, 1966, No. 28.
- 8) 堀川清司・小森修蔵: 潜堤による風波の減衰機構について, 第15回海岸工学講演会講演集, p. 340~349, 1968.