

ブロック堤の消波効果に関する実験的研究

沼田 淳*

1. はじめに

最近、砂浜消失に対する対策として、消波ブロックを用いた離岸堤が多く試みられるようになってきた。この種構造物の消波効果に関する研究は、内外において数多く発表されているが、鉛直捨石堤を対象とした研究がその大半を占め、ブロック堤に対する検討は不十分であるように思われる。著者¹⁾は、Le Méhaut²⁾ および富永・坂本³⁾の鉛直捨石堤に対する実験値を再吟味して、波高伝達率・反射率に対する実験式を求め、実用的な範囲で十分妥当な近似を与えることを確かめているが、本論文では、ブロック堤について多くの実験を行い、上と同様の手法を鉛直ブロック堤に適用して、鉛直捨石堤と同形式の実験式を求め、さらに傾斜式ブロック堤に対しても別に実験式を提案した。

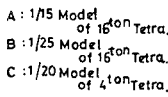
2. 鉛直ブロック堤

(1) 実験装置と実験条件

実験は、長さ 55m, 幅 1.0m, 高さ 1.5m の片面一部ガラス張りの鋼製二次元水路に、鉄枠に金網を張って作った蛇かごを設置し、その中にテトラポッドを填充した模型を対象に行った。実験条件は表一に示すとおり

表一

TEST SEC.	BLOCK		DIM. of BLOCK		DIM. of WAVE				LEGEND		
	B (cm)	h (cm)	Height (cm)	Weight (kg)	T (sec)	L (cm)	H (cm)	d (cm)			
1	47.6	63.2	A	18.9	4.52	1.8~3.0	384~720	24~20	1.4~2.7		
2	49.2	40.0				1.6~2.4	286~440	1.4~2.7			
3	28.5	37.9	B	11.3	0.97	1.36~2.3	225~422	1.2~1.5	0.8~1.6		
4	29.5	24.0				1.25~1.83	170~266	0.8~1.6			
5	22.4	29.8	C	8.9	0.49	1.23~2.1	183~342	0.8~1.4	0.6~1.3		
6	23.4	18.9				1.11~1.62	135~210	0.6~1.3			
7	20	35	C	8.9	0.49	2.0	348	2.5~2.0	2.0		
8	25	"				"	"	"		"	"
9	31	"				"	"	"		"	"
10	35	"				"	"	"		"	"
11	40	"				"	"	"		"	"
12	35	40	A	18.9	4.52	1.3~1.8	220~330	1.1~1.9	1.1~1.9		
13	45	"				"	"	"		"	"
14	55	"				"	"	"		"	"



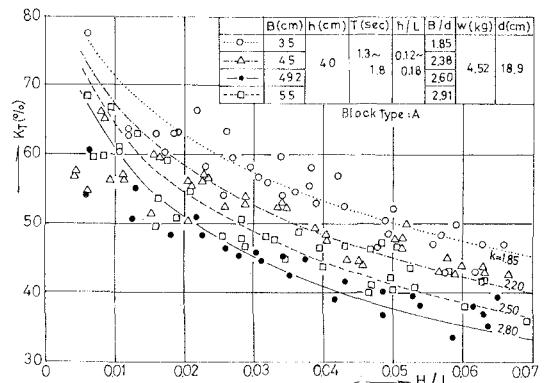
で、縮尺の影響についても検討するため、3種類の大きさのブロックを使用し、堤体形状、波の諸元などをブロックの縮尺比に合わせた実験を行った。入射波・反射波・伝達波の波高は、容量式波高計を取り付けた測定台車を沖側・岸側とも約 3m の範囲をゆっくり同時走行させ、部分重複波の腹・節における波高 H_{max} および H_{min} を測定し、ヒーラーの方法で計算した。

(2) 波高伝達率

図一は、Type A について、波形勾配 H/L と波高伝達率 K_T との関係を堤体幅とブロックの高さとの比 B/d をパラメーターとして図示したもので、 H/L および B/d の増加とともに K_T が減少する傾向が明瞭である。そこで、まず、 K_T を H/L の関数と考え、式(1)を仮定した。

$$K_T = 1 / \{1 + K(H/L)^{0.5}\}^2 \dots\dots\dots (1)$$

式(1)は、合田⁴⁾が、金網型 Wave filter を対象に導いた理論式において、 H/L の係数として示されている K_T におよぼす種々の影響要素を、一括 K とおきかえたもので、図中の曲線は、式(1)による近似曲線であり、曲線上の数字は、その近似曲線に対する K 値である。次に、式(1)中の K 値を他の Type のブロックをすべて含めて、横軸に B/d 、縦軸に K 値をとって整理すると図二に示すようになる。同図には、長尾・加藤⁵⁾の実験から推算したデータも記号を区別して示してある。若干のばらつきはあるが、ほぼ1本の曲線で近似され、 K



図一

* 正会員 東北大学助教授 工学部土木学科

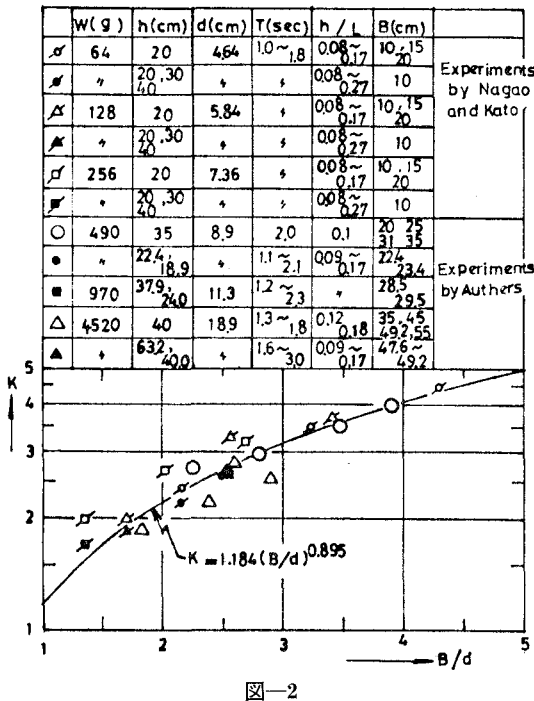


図-2

を B/d の関数として、図中に示す式によって近似できることがわかる。この式を式(1)に代入すれば、鉛直ブロック堤の波高伝達率は、式(2)のごとく表わされ、 B が一定なら、 d が小さいほど、 K_T を小さくしうることがわかる。

$$K_T = 1 / \{1 + 1.26(B/d)^{0.67}(H/L)^{0.5}\}^2 \dots\dots\dots (2)$$

なお、実験値は、すべて $h/L < 0.25$ の場合のものであるが、鉛直捨石堤に対する考察¹⁾から類推すれば、これが式(2)の適用限界と考えられる。さらに、長尾・加藤⁵⁾の実験は、著者らの実験に比べ、一段と小さいブロックを用いているにもかかわらず、ほぼ同一の曲線で近似しうることを見ると、通常行われる縮尺の実験においては、実験値のばらつきを考慮すれば、上式で十分な波高伝達率が表わせると考えられる。

(3) 反射率

反射率 K_R は、 K_T のように H/L の影響が明瞭でな

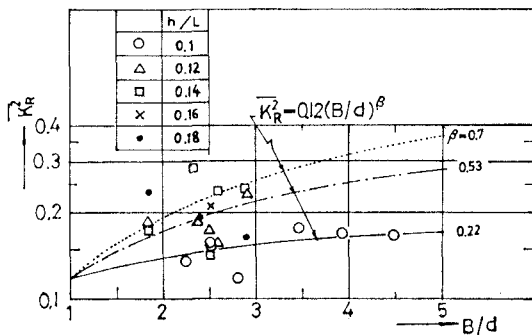


図-3

く、実験値のばらつきを考慮すると $H/L > 0.01$ では、 H/L に関係なくほぼ一定と考える良いように思われる⁶⁾。そこで、周期 T を一定に保ち、波高を種々変化させて行った一連の実験から H/L の影響を無視して、エネルギー反射率の平均値 \bar{K}_R^2 (ただし、 $H/L < 0.01$ のデータは除く) を求め、これと B/d との関係を h/L をパラメータとして示したのが図-3である。

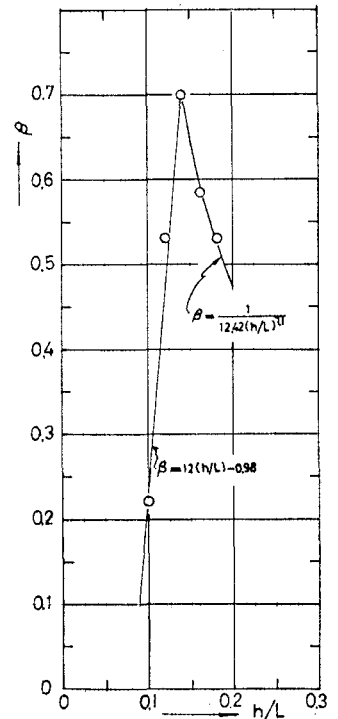


図-4

実験範囲が狭い

え、実験値のばらつきのため、はっきりした傾向を示すことが困難であるが、同図に示すように、大胆に鉛直捨石堤の場合と同形式の実験式をあてはめ、 B/d のべき乗値 β と h/L との関係を図-4のごとく求め、エネルギー反射率 \bar{K}_R^2 を式(3)のごとく表わした。

$$\left. \begin{aligned} \bar{K}_R^2 &= 0.12(B/d)^{12(H/L) - 0.98} \\ \text{ただし } h/L &\leq 0.15, B/d < 5 \\ \bar{K}_R^2 &= 0.12(B/d)^{1/(12.42(H/L)^{11})} \\ \text{ただし } h/L &> 0.15, B/d < 5 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

(4) エネルギー消散率

式(2), (3)を用いれば、鉛直ブロック堤内でのエネルギー消散率 K_i^2 は、式(4)によって計算することができる。

$$K_i^2 = 1 - (K_T^2 + \bar{K}_R^2) \dots\dots\dots (4)$$

図-5 は、式(2)~(4)による計算値と実験値とを比較した一例で、横軸が実験値、縦軸が計算値を示している。

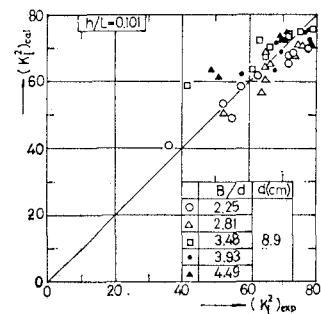


図-5

表-2

TEST SEC.	DIM. of BLOCK			BLOCK TYPE	DIM. of WAVE		LEGEND	
	b (cm)	h (cm)	hc (cm)		Height (cm)	Weight (kg)		
1	37.8	30	20	A	18.9	4.52	140	
2	40	10						
3	22.6	18	12					
4	24	6		B	11.3	0.97	232	
5	17.8	142	9.4					
6	18.9	4.7		C	8.9	0.49	291	
7	34.8	42.6	16					
8	41.4	9.6		D	12.24	1.013	420	
9	41.4	9.6						
10	399	6.0						
11	399	6.0						
12	399	6.0						

式(3)の強引な近似にもかかわらず、ほぼ妥当な結果を与えているように思われる。

3. 傾斜式ブロック堤

(1) 実験装置と実験条件

実験装置・実験方法は、鉛直ブロック堤の場合と全く同様であり、実験条件は表-2に示すとおりである。

(2) 波高伝達率

傾斜式ブロック堤の場合、越波の有無によって、 K_T はかなり違った傾向を示すようになる^{7,9)}。そこで、以下、越波のある場合とない場合にわけて検討することにする。

a) 越波がない場合

図-6は、 H/L と K_T との関係を図型ブロックの大きさおよび法面碎波・越波の有無によって記号を区別して図示したものである。図中の数字は、相対天端高 h_c/H の値を示している。この図は、 h_c/H がすべて1より大

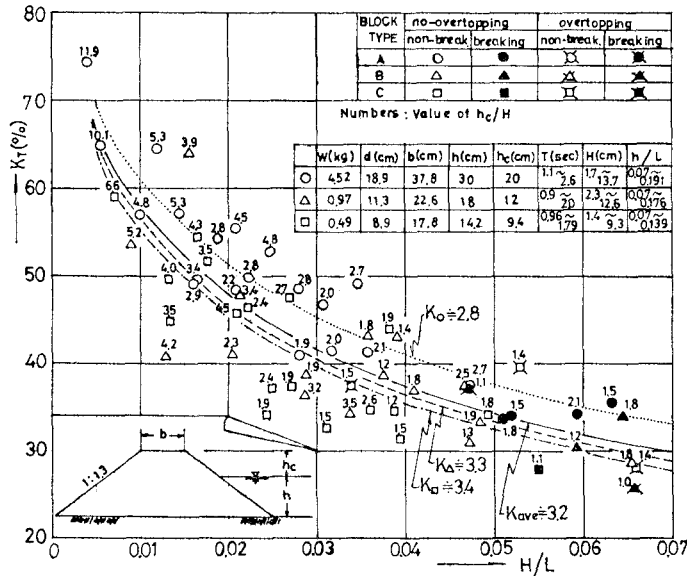


図-6

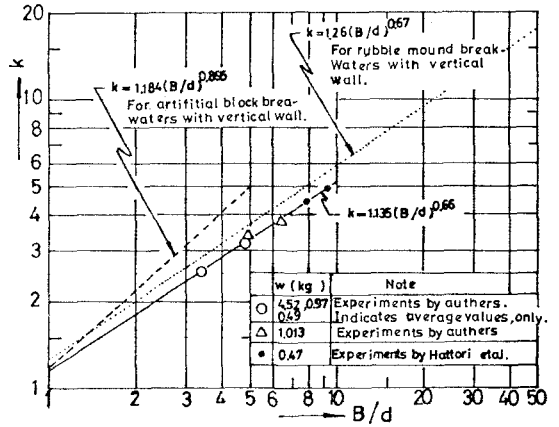


図-7

きい場合の実験結果であり、越波が全くないか、あってもごくわずかであって、非越波の状態の実験と見做して良い。図中の曲線は、それぞれのブロックに対する実験値に式(1)をあてはめた場合の実験曲線で、実験値のばらつきは大きい。鉛直堤の場合と同様、 H/L の増加とともに K_T が減少する傾向が認められる。図-7は、このようにして求めた K の平均値と水面における堤体幅 B_s と d との比 B_s/d との関係を示したものである。傾斜ブロック堤の場合も、 K と B_s/d との関係は、両対数方眼紙上で直線で近似され、図示のような実験式を得ることができる。この K 値を式(1)に代入すれば、傾斜ブロック堤の非越波時の波高伝達率は、式(5)のごとく表わされる。

$$K_T = 1 / \{1 + 1.135(B_s/d)^{0.66}(H/L)^{0.5}\}^2 \dots (5)$$

図-7には、鉛直ブロック堤に対して求めた K 値も併記したが、両者を比較すると、 $B/d = B_s/d$ 、すなわち、図-8に示すような断面の鉛直堤・傾斜堤の波高伝達率は、ブロックの大きさが同じなら、後の方が大きくなるという一見矛盾する結果となるが、これは傾斜堤では、のり面への波の翹上が鉛直堤に比べ増大するためと考えられる。また、両者の比較から、傾斜堤の波高伝達率は、浅海域では、水面下の堤体幅より水面上の堤体幅に依存するといえよう。

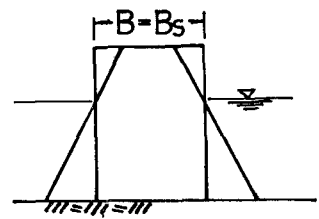


図-8

b) 越波がある場合

越波がある場合の波高伝達率が、非越波時のそれに比し大きくなることは当然予測されることであるが、この種構造物の越波量を定量化することが難しく、 K_T を越波量と関連づけることはさらに困難と思われる。そこで、ここでは、前述したように、この種構造物の波高伝達率が静水面上の堤体の形状あるいは水粒子の挙動の影響が強いという点に着目し、波頂における最大水平水粒子速度 u_{max} 、静水面上の波頂高 η_0 および周期 T の積と越波量との間に、ある関係が成立するものと仮定し、これを静水面上の堤体容積 $\bar{B} \cdot h_c$ (\bar{B} : 静水面上の平均堤体幅、 h_c : 静水面上の天端高) で無次元化した値と K_T の関係を調べることとした。図-9は、横軸に $(u_{max}\eta_0 T)/(\bar{B}h_c)$ 、縦軸に波高伝達率 K_T を取

$$u_{max} = \frac{\pi H}{T} \sqrt{1 + \alpha \left(\frac{H}{h}\right)^{1/2} \left(\frac{h + \eta_0}{h}\right)^8} \cdot \frac{\cosh k(h + \eta_0)}{\sinh kh} \dots\dots\dots (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\eta_0}{h} &= \frac{H}{2h} + 0.455 \left(\frac{H}{h}\right)^{2.18}, & \alpha &= -0.646 \log \left\{ 1.562 \left(\frac{h}{L}\right) \right\}, \text{ただし } 0.07 < h/L < 0.4 \\ \text{ただし, } H/h < 0.8, & & & = 1.50 & & h/L < 0.07 \\ & & & = 0.25 & & h/L > 0.4 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

実験値は、 $\eta_0 < h_c$ の場合と $\eta_0 > h_c$ の場合を記号を区別して示してあるが、後者は、越流状態で大量に越波する場合に相当すると考えられる。 $\eta_0 < h_c$ の場合は、 $(u_{max}\eta_0 T)/\bar{B}h_c$ の増加とともに K_T が増加する傾向が認められるが、 $\eta_0 > h_c$ になると K_T は逆に減少し、 $(u_{max}\eta_0 T)/\bar{B}h_c$ の値に関係なくほぼ一定となるような傾向を示している。これは、越波水によって堤内水位が上昇し、越波

て図示したものである。 $u_{max}\eta_0$ の計算は、合田⁹⁾による実験式(6)を用いたが、計算の便宜上係数 α および η_0/h は、実験曲線を式(7)のように近似して使用した。

水の落差および堤体内を透過するエネルギーなどが減少することに起因するもので、本実験に特有な現象であると考えられる。しかし、現地海岸では、大量の越波水があっても、実験水路で見られるような堤内水位の極端な上昇はないと考えられるので、本実験結果を現地へ適用する場合、これら実験値のほぼ上限値(図中の実線)を用いるのが妥当であろう。この曲線は、式(8)によって近似したものである。

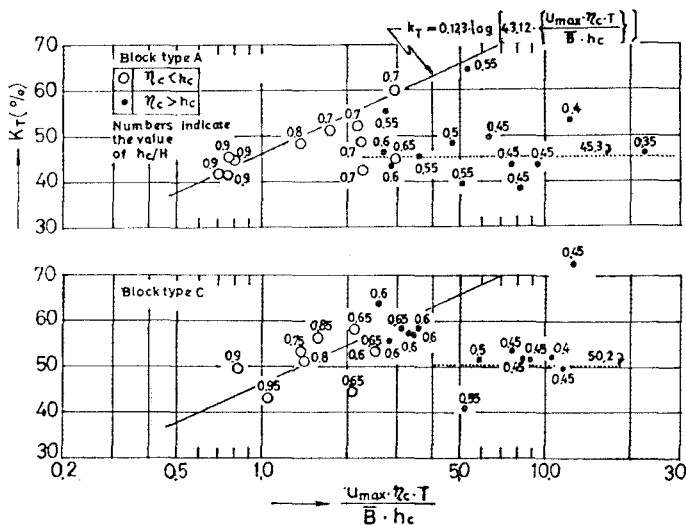


図-9

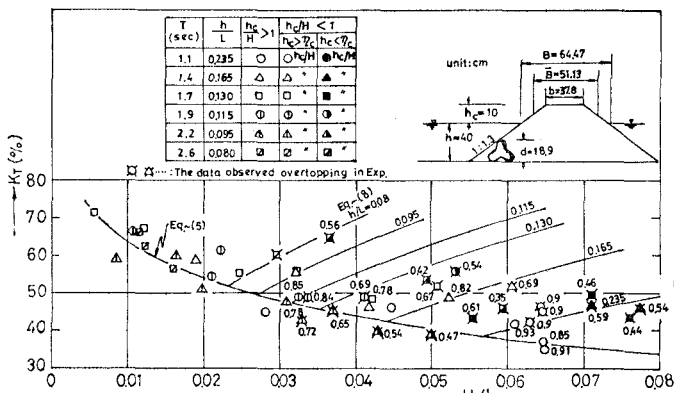


図-10

$$K_T = 0.123 \log \left[43.12 \times \left\{ \frac{u_{max}\eta_0 T}{\bar{B}h_c} \right\} \right] \dots\dots\dots (8)$$

図-10は、式(5)および式(8)による計算値と実験値を比較した一例で、実験値は $h_c/H > 1$ と $h_c/H < 1$ とに分け、後者には h_c/H の値を記号と一緒に併記した。さらに、 $h_c/H < 1$ の実験値は、 $h_c \geq \eta_0$ によって記号を区別した。 $h_c/H > 1$ の実験値は、ほぼ式(5)によって近似され、 H/L の増加とともに K_T が減少する傾向を示すことがわかる。一方、 $h_c/H < 1$ で、 $h_c > \eta_0$ の実験値は、 h/L をパラメーターとして示した式(8)による曲線とほぼ同じように H/L の増加とともに増加

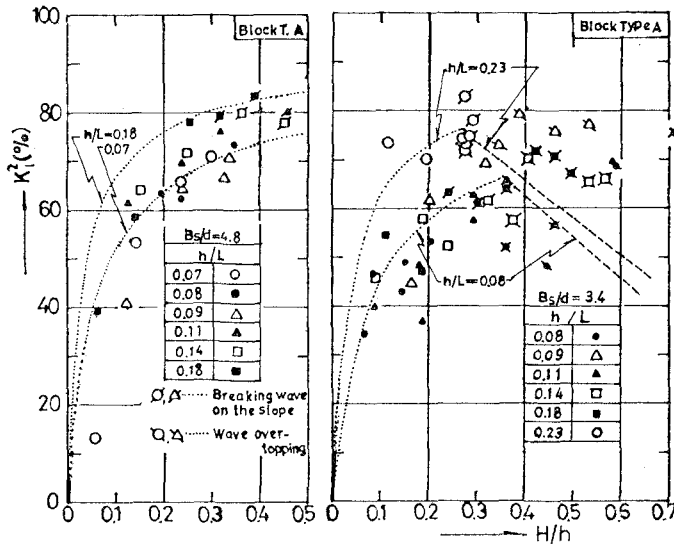


図-11

するが、 $h_0 < r_0$ になると、式(8)による値よりかなり小さくなり、前述したように、 H/L あるいは h/L に関係なく、ほぼ一定の値となるように思われる。

(3) エネルギー消散率

傾斜ブロック堤の反射率 K_R は、実験値のばらつきが、さらに大きくなる(特に越波時のばらつきが大きい)が、本実験の範囲内では、 $H/L > 0.01$ のときの K_R の値は、越波・非越波に関係なく、 $0.2 \sim 0.4$ の範囲にあり、実験のばらつきを考慮すれば、 $\bar{K}_R \approx 0.3$ と見做して良いように思われる。図-11は、 $\bar{K}_R = 0.3$ とし、式(5)(図中の点線)あるいは式(8)(図中の破線)から計算した K_T を用いて、式(4)によって求めた K_I^2 の計算値と実験値を比較した一例である。非越波時のエネルギー消散率(点線)は、ほぼ、妥当な近似を与えるように思われるが、越波時のエネルギー消散率(破線)は、前述したような実験水路の特性のため、計算値ほど非越波時の値より小さくはなっていない。

4. むすび

以上、鉛直ブロック堤、傾斜式ブロック堤の波高伝達率・反射率について実験的な検討を試みた。前者については、実験値の不足を鉛直捨石堤に対する検討結果⁹⁾に基づいて補足し、 K_T 、 \bar{K}_R 、 K_I^2 に対する実験式として、式(2)、(3)、(4)を導き、実用的な範囲($h/L < 0.25$)では、ほぼ妥当な近似を与えることを示した。一方、後者の場合の K_T は、非越波時と越波時にわけ、それぞれ式(5)、(8)の実験式を導いた。この場合、非越波・越波の限界は、厳密には、 $h_0 \geq r_0$ とすべきと思われるが、実

験値のばらつきを考え、安全を考慮すれば $h_0/H \geq 1$ として差し支えないと思われる。また、この場合の K_R は、 $H/L > 0.01$ では、ほぼ一定(=0.3)と考えて良いように思われるが、 h/L あるいは B_s/d の影響について、さらに検討する必要がある。なお、この種構造物の K_T 、 K_R 、 K_I^2 におよぼす縮尺の影響は、通常行われている縮尺の模型実験では、実験値のばらつきと同程度と考えられ、特に考慮する必要はないと思われる。

最後に、本研究を行うにあたり、終始御指導を賜った東北大学 岩崎敏夫教授に深く感謝の意を表します。また、本実験を遂行するにあたり、東北大学職員 佐藤弘、佐藤栄二両技官、当時大学院生 陳国敏、学生熊谷 博(現五洋建設)、横山正信(現鹿島建設)の諸氏の熱心な

御協力を得ることができた。ここに記して感謝の意を表するとともに、本研究は、計画研究(研究代表者 京都大学岩垣雄一教授)の一部であることを付記し深謝致します。

参 考 文 献

- 1) 沼田 淳: 透過性直立捨石防波堤の消波効果の実験式, 土木学会第30回年次学術講演会講演集 2, 昭和50年.
- 2) Le Méhauté, B.: Perméabilité des diques en enrochement aux oudes de gravité Périodiques, La Houille Blanche, No. 2, 1958, pp. 148~179.
- 3) 富永正照・坂本忠彦: 透過性構造物による波の変形に関する研究(1), 土木研究所報告, 第137号, 1970, pp. 117~140.
- 4) Goda, Y. and Ippen, A.T.: Theoretical and Experimental Investigation of Energy Dissipators Composed of Wire Mesh Screen, M.I.T. Hydraulic Laboratory, Report No. 59, July, 1963, pp. 1~66.
- 5) 長尾義三・加藤久徳: 直立消波岸壁に関する二・三の実験的研究, 第17回海岸工学講演会論文集, 1970, pp. 145~153.
- 6) 沼田 淳: 透過性構造物の波浪制御に関する実験的研究, 第11回災害科学総合シンポジウム講演論文集, 1974, pp. 297~298.
- 7) 岩崎敏夫・沼田 淳: 透過性防波堤の波高伝達率に関する実験的研究, 第20回海岸工学講演会講演集 1973, pp. 55~61.
- 8) 服部昌太郎・堺 和彦: ブロック積防波堤の波高伝達率に関する実験的研究, 第20回海岸工学講演会論文集, 1973, pp. 55~61.
- 9) Goda, Y.: Wave forces on a vertical circular cylinder: Experiment and Proposed Method of Wave force computation, Rept. Port and Harbour Res. Inst., No. 8, 1964, pp. 1~74.