

傾斜堤の波高伝達率算定法に関する実験的研究

竹田 英章 *・及 川 研**・宮地 陽輔***
坂本 洋一****・上西 隆広*****

1. ま え が き

傾斜堤の水理機能、すなわち越波を含む伝達波特性、反射波特性、堤体内部のエネルギー消散特性などについて従来より数多くの研究がなされてきた。透過性構造物としての理論的解析では、富永・坂本¹⁾、井島ら²⁾、近藤ら³⁾等が長波理論解を示している。実験的には、岩崎・沼田^{4),5)}、服部・堺⁶⁾、三浦・遠藤⁷⁾等の研究成果が報告されている。しかし、現地に傾斜堤を採用する場合、透過性をどのように定量的に把握するかが設計実務者の苦慮するところになっている。

こうした要請に対応して、著者らは上記研究成果をもとに、通常使われているブロック式傾斜堤の伝達波特性、さらに波高伝達率を低くするために堤体内に芯壁を設置した特殊な傾斜堤の伝達波特性に関して、水路実験を実施してきた⁸⁾。本報文は、それらの結果に基づいて定量化を試み、実用上での波高伝達率算定の方法について一定の成果を得たので報告するものである。

2. 実験方法

実験は、図-1に示す長さ 28.0m、幅 0.8m、高さ 1.0m のペンデュラム型造波機を備えた水路を用いた。水路の途中から最終端までの間は幅 0.51m と 0.29m に仕切り、0.51m の水路に模型を設置した。

入射波高 H_i は、無堤時の沖波高と通過波高との関係

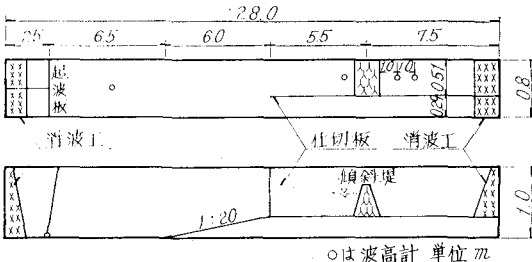


図-1 実験水路

- * 正会員 北海道開発局 小樽開発建設部技術長
** 正会員 工修 運輸省第一港湾建設局 新潟調査設計事務所
*** 正会員 工修 北海道開発局 港湾部 空港課
**** 正会員 北海道開発局 土木試験所港湾研究室
***** 正会員 北海道開発局 土木試験所港湾研究室

を用いて沖波高から求めた。伝達波高 H_t は、堤体背後 1m および 2m の地点で測定しその平均値とした。波高伝達率は、 $K_t = H_t/H_i$ で求めた。

3. ブロック式傾斜堤の波高伝達率

(1) 非越波の場合

実験は、表-1に示すような堤体諸元、ブロックの種類、大きさを種々変化させて行った。その堤体形状を図-2に示す。

透過性構造物の波高伝達率算定式については種々検討されており、岩崎・沼田^{4),5)}らは金網ウェーブフィルターを対象とした合田⁹⁾の波高伝達率の理論式をブロック式傾斜堤にも適用し、実験的に波高伝達率 K_t と波形勾配 H_i/L_i との関係

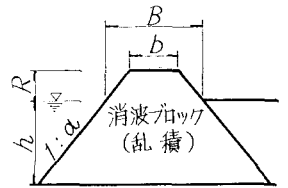


図-2 模型堤体断面

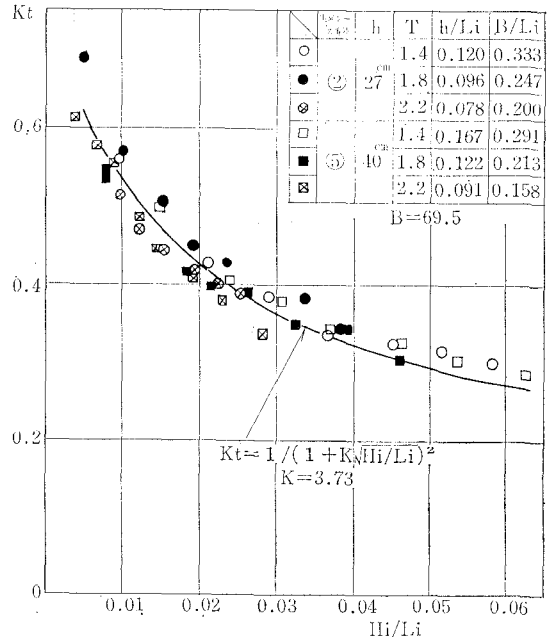


図-3 波形勾配 H_i/L_i との関係

表-1 断面諸元と使用ブロック

実験 ケース	堤 体					ブ ロ ッ ク				
	b (cm)	R (cm)	B (cm)	h (cm)	α	種 類	η (%)	d (cm)	V (cm)	B/d
1	23.6	13.0	58.3	27.0	1.33	I	50	12.1	489	4.82
2	34.8	13.0	69.5	27.0						5.74
3	56.0	13.0	90.7	27.0						7.50
4	85.6	13.0	117.6	27.0						9.72
5	34.8	13.0	69.5	40.0						5.74
6	46.0	8.32	70.0	27.0						5.79
7	17.2	12.0	49.2	25.0				9.1	209	5.41
8	26.0	6.24	44.6	27.0						4.93
9	26.0	6.24	44.6	34.0						4.93
10	26.0	12.0	58.0	25.0						6.37
11	34.4	6.24	51.0	27.0						5.64
12	42.8	12.0	74.8	25.0						8.22
13	51.2	6.24	67.8	27.0				7.2	100	7.50
14	11.2	9.0	35.2	25.0						4.89
15	16.4	9.0	40.4	25.0						5.61
16	27.2	9.0	51.2	25.0						7.11
17	36.4	13.0	75.4	27.0	1.50	II	55	11.4	415	6.61
18	97.1	13.0	136.1	27.0						11.94
19	19.5	11.0	52.5	27.0				9.3	222	5.65
20	29.2	11.0	62.2	27.0						6.69
21	48.7	11.0	81.7	27.0						8.78
22	15.5	9.0	42.5	27.0				7.3	111	5.82
23	23.2	9.0	50.2	27.0						6.88
24	38.7	9.0	65.7	27.0						9.00
25	33.4	13.0	72.4	27.0	1.50	III	56	12.2	439	5.93
26	53.4	13.0	92.4	27.0						7.57

を 図-3 に示す。図より非越波時では式 (1) が実験値を高い相関度で近似できることから、特定断面の波高伝達率を表わすうえで有効な式であることを確認した。

沼田らは、式 (1) の係数 K を表わす指標として、堤体幅 B とブロック寸法 d との比 B/d を用いている。著者らの実験結果を同様に整理し、ブロック形状別に 図-4 に示す。図によると、ブロック形状が同一の場合には K と B/d はほぼ直線関係となるが、ブロック形状別に有意な差が認められる。これは、ブロック形状別にその寸法 d の意味するところが異なり、その空隙率も異なるため、堤体幅 B とブロック寸法 d だけでは任意のブロックを用いた断面の特性を表わし得ないものと考えられる。

そこで、 B/d に代えて係数 K を表わす、より汎用性のある指標として『静水面における堤体直角方向からみた単位投影面積当りのブロック総表面積 K_A 』を導入する。

いま、あるブロックの表面積 A 、体積 V は、ブロック寸法を d として $A=ad^2$ 、 $V=\beta d^3$ と表わせるから、ブロックの空隙率を η として、 $a \times a \times B$ なる直方体の中に含まれ

るブロック個数は、

$$n = \frac{a^2 B (1 - \eta)}{V} \quad (2)$$

となり、そこに含まれるブロック総表面積 ΣA は、

$$\begin{aligned} \Sigma A &= nA = \frac{a^2 B (1 - \eta) A}{V} \\ &= \frac{a^2 \alpha (1 - \eta)}{\beta} \cdot \frac{B}{d} \quad (3) \end{aligned}$$

となる。ゆえに、 $1 \times 1 \times B$ に含まれるブロックの総表面積 K_A は、

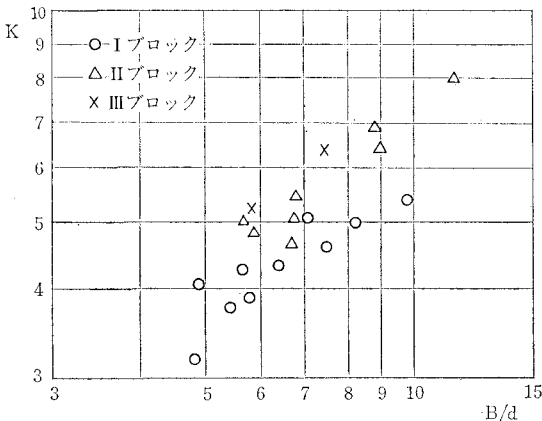
$$K_A = \frac{\Sigma A}{a^2} = \frac{\alpha (1 - \eta)}{\beta} \cdot \frac{B}{d} \quad (4)$$

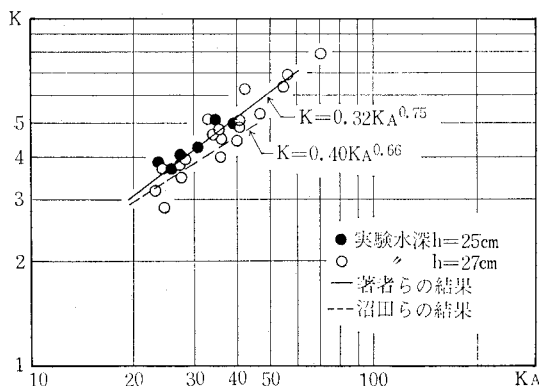
で表わされる。また式 (4) は、

$$K_A = \frac{A}{V(1 - \eta)} \cdot B = \frac{A(1 - \eta)}{V} B \quad (5)$$

と置き換えられることから、 K_A は『単位体積当りのブロック総表面積と静水面での堤体幅との積』ともいえる。

K_A の導入により、実験で得た係数 K とこの K_A と

図-4 B/d で表わす K の値

図-5 K_A で表わす K の値

の関係は、図-5 に示すようになり、図-4 に比してブロック形状別の差が少なくなり、各種ブロックの伝達波特性を統一的に表わし得ることになる。ここに実験式は、

$$K=0.32K_A^{0.75} \quad (6)$$

となる。なお、沼田らの実験結果も同様に整理し、同図に示した。

実設計では、表面を大型ブロックで被覆し、中詰に小型ブロックを用いる複合形式の傾斜堤断面を採用する場合がある。この断面での K_A は、以下のようになる。被覆ブロックの寸法を d 、空隙率を η 、形状を表わす係数を α 、 β とし、中詰ブロックのこれらにはダッシュ (') を付すものとする。被覆層の水平幅は被覆ブロックの寸法に比例するので $\gamma \cdot d$ と表わせる。堤体幅 B のうち $(B-2\gamma d)$ は中詰ブロックの幅になる。ゆえに、式 (3) を書き変えると K_A は、

$$\begin{aligned} K_A &= \frac{\Sigma A}{1 \times 1} = \frac{2\gamma d(1-\eta)}{\beta d^3} \alpha d^2 \\ &+ \frac{(B-2\gamma d)(1-\eta')}{\beta' d'^3} \alpha' d'^2 \\ &= (1-\eta') \frac{\alpha'}{\beta'} \frac{1}{d'} (B-2\gamma d \\ &+ \frac{1-\eta}{1-\eta'} \frac{\alpha \beta'}{\alpha' \beta} 2\gamma d') \quad (7) \end{aligned}$$

と表わされる。ここで、

$$B' \equiv B - 2\gamma d + \frac{1-\eta}{1-\eta'} \frac{\alpha \beta'}{\alpha' \beta} 2\gamma d' \quad (8)$$

とおくと、

$$K_A = (1-\eta') \frac{\alpha'}{\beta'} \frac{B'}{d'} \quad (9)$$

となり、式 (4) と同一表示になる。さらに、被覆ブロックと中詰ブロックが同一形状で同じ空隙率ならば、

$$K_A = (1-\eta') \frac{\alpha}{\beta} \frac{B-2\gamma d+2\gamma d'}{d'} \quad (10)$$

となる。すなわち、静水面での堤体幅を $(B-2\gamma d+2\gamma d')$ とした中詰ブロックだけの様な断面として換算できることを示している。

以上より、ブロック式傾斜堤の波高伝達率は、

$$K_t = \frac{1}{(1+0.32K_A^{0.75}\sqrt{H_i/L_i})^2} \quad (11)$$

により算定できる。

なお、3種のブロックについて K_A の算出に必要な α 、 β 、 γ および $\alpha(1-\eta)/\beta$ の値を表-2に示す。

表-2 各種ブロックの定数

ブロック種類	α	β	η	$\alpha(1-\eta)/\beta$	ブロック寸法
テトラポッド	2.69	0.278	0.50	4.84	 d
中空三角	3.83	0.284	0.55	6.07	 d
六脚	3.33	0.260	0.56	5.64	 d

($A=\alpha d^2$, $V=\beta d^3$, η は乱積の空隙率)

(2) 越波の場合

実験に用いたブロックは 480g テトラポッドで、模型堤体はのり勾配を 1:1.33 とし、天端高を種々変化させ、表-3 に示す断面諸元で実施した。実験波の周期は、 $T=1.2, 1.6, 2.0$ 、および 2.4sec の4種類とし、波高は約 2cm から堤体前面で碎波するまで徐々に上げて実験を行った。

表-3 断面諸元

実験ケース	天端幅		天端高	堤体幅	水深	斜面勾配	空隙率
	個並び	b (cm)	h_e (cm)	B (cm)			
1	3	26.0	12.48	59.28	27.0	1.33	0.49
2	"	"	9.36	50.96			0.46
3	"	"	7.80	46.80			0.44
4	"	"	6.24	42.64			0.50
5	"	"	4.68	38.48			0.46
6	"	"	3.12	34.32			0.48
7	"	"	0.00	26.00			0.50
8	5	42.8	9.36	67.76			0.49
9	"	"	6.24	59.44			0.48
10	"	"	3.12	51.12			0.49
11	"	"	0.00	42.80			0.50
12	7	59.6	9.36	84.50			0.49
13	"	"	6.24	76.24			0.45
14	"	"	3.12	67.92			0.49
15	"	"	0.00	59.60			0.46

越波にともなう波高伝達率 K_t の変化は、入射波高 H_i 、波長 L_i 、静水面上の天端高 R 、静水面での堤体幅 B などの影響を受けると考えられるので、これらについて実験に基づき考察する。 H_i の影響をみると、越波を始めると H_i の増大とともに K_t が増加する傾向を示す。 H_i がさらに大きくなると、ある H_i で K_t がピークをもち、その後は K_t が減少する。こうした傾向はいずれの断面でも同様であるが、周期 T の長いものほど

K_t が大きくなっている。また、 B が大きくなると K_t が小さくなり、このとき、 R/H_i にともなう K_t の変化が緩くなり、越波しても K_t がそれほど大きくならない傾向がある。越波時の K_t は、 B が小さいほど大きく、 T が長いほど大きくなる。また、越波が生じた後 K_t ののピークは波が天端上で碎波する直前のときで、それより大きな波では天端前面で碎波するため K_t が減少する。従って、 K_t のピークの前後では、伝達波の特性が異なる。そこで、越波が生じ始めて K_t が増加する状態に着目し、そのときの R/H_i との関係を B/L_i ごとに求めた結果を図-6 に示す。この関係は、 K_t が R/H_i にほぼ

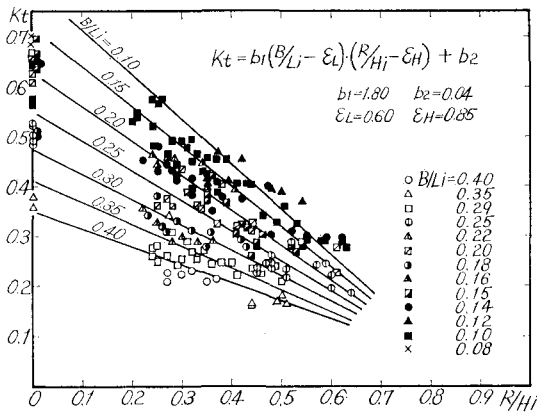


図-6 越波時の波高伝達率 (天端ブロック3個並び)

比例し、また、 B/L_i に比例することから、

$$K_t = b_1(B/L_i - \varepsilon_L)(R/H_i - \varepsilon_H) + b_2 \quad (12)$$

で表わされる。なお、図中の $R/H_i=0$ のデータは、 $R=0$ における越波時の K_t のピーク値を示したものである。

通常の設計で用いられる天端3個並びの場合の実験値を式 (12) で回帰すると、

$$\left. \begin{aligned} b_1 &= 1.80, & \varepsilon_L &= 0.60 \\ b_2 &= 0.04, & \varepsilon_H &= 0.85 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

となる。

4. 内部に壁体を有する傾斜堤の波高伝達率

傾斜堤を採用する場合、その透過波をいかに小さくするかが問題となる。ここでは、既に施工例のある傾斜堤内に不透波の芯壁を設置した場合、および港内浄化の面からこれを多孔式とした場合について述べる。

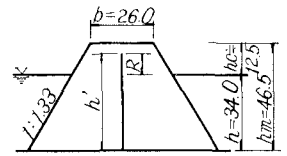
(1) 不透波芯壁をもつ場合

実験に使用したブロックは 480g テトラポッドで、堤体断面および芯壁の諸元を図-7 と表-4 に示す。

この場合にも越波時と同様に、芯壁の高さ R が大きな影響因子となっていることから、静水面上の芯壁の高さ R の入射波高 H_i に対する比 R/H_i と波高伝達率 K_t との関係で実験結果を整理した。その結果を図-8 に示

す。

図によると、 R/H_i が負から正に近づくにつれて K_t は減少する。さらに R/H_i が正になると K_t の減少状態が緩やかになる。芯壁が低い場合には傾斜堤の特性を示



(堤体形状)

図-7 模型堤体断面

表-4 芯壁の諸元

	h'/h_m	実験波
不透波	1.0	$H_i \approx 2 \sim 16$ cm $T_m = 1.2, 1.6, 2.0, 24$ sec $h/L = 0.08 \sim 0.18$ $h_c/H_i = 0.8 \sim$
	0.9	
	0.8	
	0.7	
	0.6	
壁	0.5	
	0	

し、芯壁が高くなると直立堤に近い性質を示している。

そこで、芯壁のみの波高伝達率を、合田・竹田¹⁰⁾の直立堤の波高伝達率算定式、

$$K_t = 0.5 \left\{ 1 - \sin \frac{\pi}{2\alpha} \left(\frac{H}{R} + \beta \right) \right\}$$

ここに、 $\alpha = 1.8$, $\beta = 0.1 \dots \dots (14)$

により求め、芯壁を除いた傾斜堤部分の波高伝達率を式 (11) で求めて、その積を計算したものが図中の曲線である。 R/H_i が $-1.5 \sim 0.5$ の範囲では実験値と合うことから、ここに示した方法により波高伝達率を求めることが可能である。

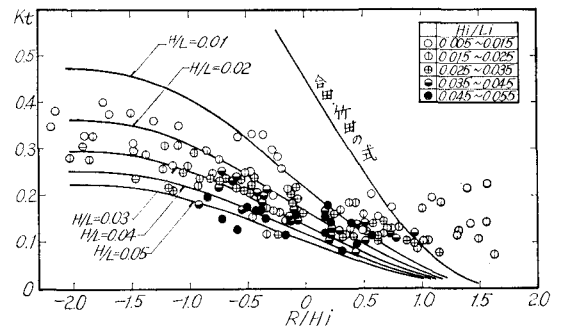


図-8 不透波芯壁をもつ傾斜堤の波高伝達率

(2) 多孔芯壁をもつ場合

実験に使用したブロックは 480g テトラポッドで、堤体断面諸元は図-9 に示す一定断面とした。芯壁は厚さ 18mm の合板で製作し、直径 15, 24, および 30mm の円孔をあけ、3~30% の空隙率とした。なお、実験波の条件は不透波芯壁の場合と同様である。

波高伝達率 K_t と波形勾配 H_i/L_i との関係を調べる

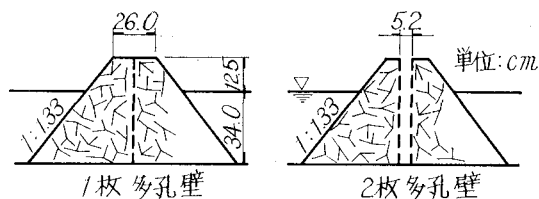
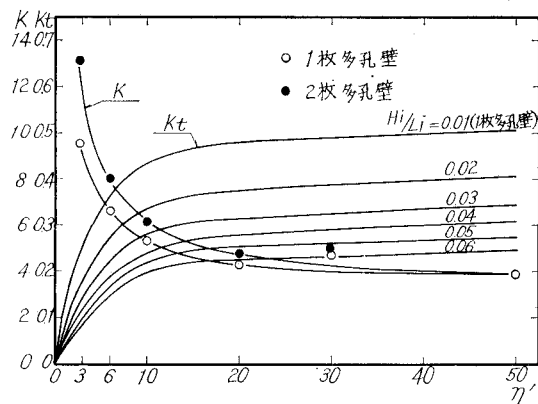


図-9 模型堤体断面

図-10 多孔芯壁をもつ傾斜堤の K の値と波高伝達率

と、多孔芯壁を設置した場合にも式(1)を適用できることがわかった。図-10に芯壁の空隙率 η' と K_t の関係を示す。ここに、 $\eta'=50\%$ における K の値は芯壁の無い場合の値である。なお、図には併せて一枚多孔壁の場合の K_t の値を H_i/L_i 別に示してある。

図より、多孔芯壁は空隙率が概ね10%以下においてその効果が顕著になることがわかる。

近藤ら¹¹⁾は、透過性堤体内に抵抗の大きいコア層がある場合には、コア層が堤体の波高伝達率に対して支配的になることを示している。したがって、当該形式傾斜堤の波高伝達率 K_t は、越波しない範囲では、図-10の K の値から式(1)で求めてもさしつかえないと考えられる。

5. 結 論

- (1) ブロック式傾斜堤；非越波の場合は式(4)と式(11)で、越波の場合は式(12)と式(13)で波高伝達率を求めることができる。
- (2) 堤体内に小型ブロックを使用する傾斜堤；式(8)と式(9)で K_A を求め、結論(1)のブロック式傾斜

堤と同様にして波高伝達率を求めることができる。

- (3) 堤体中に不透過芯壁をもつ場合； R/H_i が $-1.5 \sim +0.5$ の範囲では、堤体を傾斜堤の部分と芯壁の部分に分け、傾斜堤の部分は式(4)と式(11)で、芯壁の部分は式(14)で波高伝達率を求め、その積を波高伝達率とすることができる。
- (4) 堤体中に透過性の芯壁を設置する場合；芯壁の空隙率は10%以下とし、図-10で K を求め、式(1)により波高伝達率を求めることができる。

6. あとがき

本報告は、ブロック式傾斜堤の波高伝達率を実用面からいかに定量的に把握するかについて考察したものである。諸兄の御叱責をいただければ幸である。

参 考 文 献

- 1) 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)，第16回海岸工学講演会講演集，pp. 309～319，1969。
- 2) 井島武士・江口泰彦・小林 彰：透過性防波堤と岸壁に関する研究，第18回海岸工学講演会論文集，pp. 121～130，1971。
- 3) 近藤俊郎・藤間 聡・浅野潤一：透過性防波構造物の水利特性(第1～3報)，第17，18，19回海岸工学講演会論文集，1970，1971，1972。
- 4) 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16回海岸工学講演会講演集，pp. 329～334，1969。
- 5) 沼田 淳：ブロック堤の消波効果に関する実験的研究，第22回海岸工学講演会論文集，pp. 501～505，1975。
- 6) 服部昌太郎・堺 和彦：ブロック積み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，pp. 55～61，1973。
- 7) 三浦 晃・遠藤茂勝：ブロック積み傾斜防波堤の波高伝達率に関する実験的研究，第23回海岸工学講演会論文集，pp. 129～133，1976。
- 8) 著者ら，ほか：傾斜堤の水利機能に関する調査研究(第1報～4報)，第21回～第24回北海道開発局技術研究発表会，1978～1981。
- 9) Goda, Y. and Ippen, A. T.: Theoretical and Experimental Investigation of Energy Dissipator Composed of Wire Mesh Screen, MIT Hydraulic Lab. Rep., No. 59, 1963.
- 10) 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，pp. 87～96，1966。
- 11) 近藤俊郎・藤間 聡・葛西勝栄：透過性防波堤におけるコアの効果に関する研究，第22回海岸工学講演会論文集，pp. 495～499，1975。