

消波堤の透過率に対するブロック・スケールの効果について

大阪大学工学部 正会員 榎木 亨
大阪工業大学 正会員 井田康夫
大阪工業大学 正会員 福田 護

1. 緒 言

今日わが国の沿岸で広く用いられている透過性構造物は施工、維持管理の容易さ、工期の短かさなどの利点から防波堤、離岸堤などとして多用されているほか近年では適度な透過波浪や海水交換を期待する水産増養殖施設やリゾート海浜などの消波堤として使用されている。このため従来、ブロック積み堤の透過率、反射率に関する数多くの研究が行なわれ、特に透過率に関しては富永・坂本¹⁾の構造物内で線形抵抗を受けると考えた場合の理論的検討、近藤²⁾による長波近似理論の他、沼田³⁾に代表される実験的取扱いなど多数の算定式が提案されている。しかしながらこれらの算定式は、ブロックの空隙率や堤体幅の無次元量など構造物側の条件が主体となっている場合が多く、入射波の特性と構造物の特性との相互の関係が式中に充分反映されていないようである。その上ブロックの大きさは来襲波に対する安定論から定まってしまうことが多い。一方富永・九津見⁴⁾は海岸堤防前面の消波工の検討にあたり透過率における、波高とブロック径の比の重要性を指摘している。

近年のように消波堤の背後水面の積極的利用を考えた場合、ブロックの大きさおよび堤体幅と変化する入射波の大きさの関係を明らかにして波を制御し、必要な波浪を透過させる必要があろう。また現実には大規模消波堤の場合には中詰め工が施工されることが多いがこの中詰め工の消波効果を論議する上においても透過波に対するブロックの大きさの効果を明らかにしておかなければならない。

本論文はこのような観点から堤体内部の抵抗を考える場合、波高と空隙の大きさの比が重要な因子となる点に注目し、中詰め工も含む消波堤の透過率を見直すための第一歩として規則波を用い、均等なブロックで構成された直立ブロック堤の透過率に対する入射波とブロックの大きさの効果を数多くの実験結果に基づいて考察を加え、透過率に及ぼす各パラメータの影響を明らかにし、透過率に関する算定式を検討したものである。

2. 透過率の関数形

連続した空隙を有する構造物を通過する波の透過現象は波の特性（水深、波高、波長など）、構造物の材料特性（透水係数など）ならびに構造物の形状特性（天端高、堤体幅、のり面勾配など）が複雑に関係す

るものである。

一般に水平床上に設置された透過性構造物を通過する波は次の諸量が関係する。

$$\Phi(H_T, H_I, L, h, k, B, \alpha, R, \rho, g) = 0 \quad \dots (1)$$

ここで、 H_T : 透過波高、 H_I : 入射波高、 L : 入射波長、 h : 水深、 k : 透水係数、 B : 堤体幅、 α : のり面勾配、 R : 天端高、 ρ : 水の密度、 g : 重力加速度。

次に透過現象を基本的に把えるため以下のように考え、図-1にその説明図を示す。

1) のり面上における砕波などの影響を除くため、構造物は直立とする。

2) 波は非越波とする。

3) 透水係数は空隙構造が持つ波の通過し易さを示す指標の1つで、定常流の場合、空隙の形状・大きさとその配置により決まるものと考えられる。構造物に用いられる材料の形とその積み方が決まればその材料1個の代表長さで透水係数は表現できることから、波の場合も拡張して同様に考えることとする。

この結果、式(1)は次式のようになる。

$$\Phi(H_T, H_I, L, h, d, B, \rho, g) = 0 \quad \dots (2)$$

ここで、 d : ブロックの代表長さ

式(2)を次元解析により整理すると透過率 K_T は

$$K_T = H_T/H_I = f(h/L, H_I/L, H_I/d, B/L) \quad \dots (3)$$

となる。このうちブロックの代表長さに対する入射波高の大きさを示す無次元量 H_I/d は波高が水粒子速度を大きく左右する要素であることを考えると、分子は水粒子速度を与える代表値、分母は材料形状を特定した場合の透水係数を表わすものとなるから、この無次元量は堤体内部の運動や抵抗を表現するものの1つとも考えられる。

そこで透過率と無次元量 h/L 、 H_I/L 、 H_I/d 、 B/L の関係を実験的に明らかにし、その関係式を得ることとする。

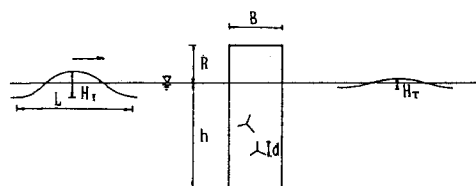


図-1 記号説明図

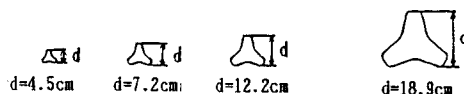


図-2 テトラポッド模型

3. 透過率の測定

(1) 実験装置および方法

実験は高さ0.9m, 幅0.8m, 長さ30mの造波水槽にテトラポッド模型を乱積みした直立堤（両端は金網で被覆）を設けて行なった。天端高は越波させないようすべて0.9mである。

透過波高は堤体後面より常に約2m離れた位置で測定し、入射波高は同位置における無堤時の値とした。

透過波高の測定はいずれも水槽側面に貼付したスケール（最小目盛1mm）上の水位をビデオカメラで記録し、これから読み取った。なお実験はすべて2回ずつ行ない、透過率はその平均値で表わすものとする。

(2) 実験の種類

実験に用いた入射波はすべて規則波で、表-1に示すように4つの比水深グループに分けられる合計68個の波である。

堤体は図-2に示すテトラポッド模型を4種類（高さ $d=4.5, 7.2, 12.2$ および 18.9cm ）、堤体幅を3~4種類（堤体幅 $B=10\sim 200\text{cm}$ ）とし、 H_1/d および B/L の値が広範囲に得られるように構築した。詳細を表-2に示す。

4. 実験結果と考察

堤体材料の大きさ、堤体幅ならびに入射波の組合せから合計1019個の透過率を得た。これらの多数のデータを2.で記述した透過率に対する重要な因子である h/L , H_1/L , H_1/d ならびに B/L で整理することとするが、このうち h/L は4種類しかないことから、 h/L =一定のもとで他の3因子と透過率の関係について考察する。

(1) H_1/d の効果

図-3は透過率に対する H_1/d の効果を B/L をパラメータに表わしたものの1例であり、 $h/L=0.100$, $H_1/L=0.020$ ($0.016\sim 0.024$) の場合である。

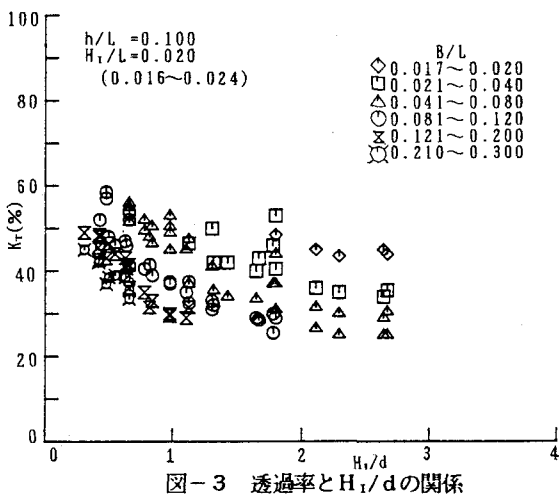


図-3 透過率と H_1/d の関係

同図よりいずれの B/L においても H_1/d の増加にともなって K_T は小さくなり、その減少の割合は指数関数的である。このような透過率に及ぼす H_1/d の効果は他の

表-1 入射波の諸元

比水深 h/L	0.084 (0.081~0.086)	0.100 (0.095~0.104)	0.126 (0.119~0.131)	0.169 (0.157~0.183)
水深 h (cm)	30~45	30~60	30~70	50~70
波高 H_1 (cm)	5.8~15.4	5.9~18.8	5.6~18.3	10.2~20.4
周期 T (sec)	2.00~2.60	2.00~2.60	1.60~2.40	1.60~1.80
波長 L (cm)	356~522	287~593	253~577	308~403
波形勾配 H_1/L	0.011~0.030	0.010~0.034	0.016~0.047	0.026~0.056
波の個数	12	17	27	12

表-2 構造物の諸元

テトラポッドの高さ d (cm)	4.5	7.2	12.2	18.9
堤体幅 B (cm)	10, 20, 30, 40	20, 40, 60	30, 40, 60, 100	60, 80, 120, 200
H_1/d	1.24~4.53	0.78~2.83	0.46~1.67	0.30~1.80
B/L	0.017 ~ 0.158	0.034 ~ 0.237	0.051 ~ 0.395	0.101 ~ 0.791

比水深、波形勾配の場合でも同様に認められる。

このことから、波の大きさと空隙の大きさの比、言い換えれば波高とブロックの代表長さの比が透過率に大きく関係し、この比が大きくなるほど透過率は小さくなることが判明した。

富永・九津見⁴⁾は海岸堤防前面の消波工を検討する過程でこの比を取り上げたが実験ケースが少なく、 H_1/d の幅も充分でなかったため、その重要性の指摘のみにとどまっている。

この比の持つ意味は、浅海表面波の水粒子速度を表わす式に含まれる $\pi H_1/T$ の項と、 d で代表されるその空隙構造の持つ透水係数の比が H_1/d という形で表わされ、透過率に大きな影響を及ぼしているためと考えられる。この値は今後、透過現象を考える上で極めて重要な意味を持つ数値と思われる。

(2) B/L の効果

図-4は透過率に対する B/L の効果を H_1/d をパラメータに示したものの1例であり、 $h/L=0.100$, $H_1/L=0.020$ ($0.016\sim 0.024$) の場合である。

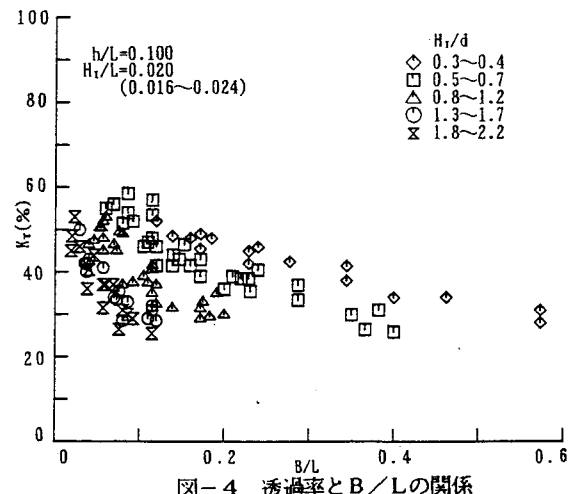


図-4 透過率と B/L の関係

図より明らかなようにいずれの H_1/d においても B/L の増加にしたがって K_T は小さくなり、その減少の割合は H_1/d と同じく指数関数的であることが認められる。

このような透過率に及ぼすB/Lの効果は他の比水深、波形勾配の場合でも同じ傾向をもつ。

このB/Lの効果はすでに多くの人によって指摘されていることであり、無次元堤体幅が透過率に及ぼす影響は非常に大きい。

(3) H_1/L の効果

図-5は透過率に対する H_1/L の効果をもB/Lをパラメータに表わしたものの1例で、 $h/L=0.100$, $H_1/d=1.0$ (0.9~1.1) の場合である。同図よりB/Lの値にかかわらずいずれも H_1/L の増加にともなう K_T の変化はあまり大きくなく、ほとんど変化の見られない場合もある。

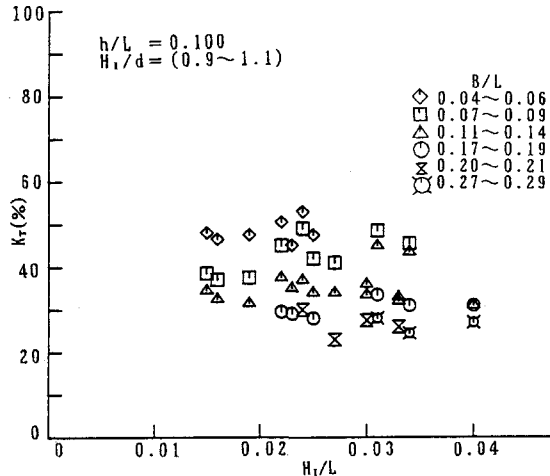


図-5 透過率と H_1/L の関係

図-6は H_1/L の効果をも H_1/d をパラメータに示したものの1例で、 $h/L=0.100$, $B/L=0.07$ (0.069~0.073) の場合である。この図からも図-5と同様、 H_1/L の増加にともなう K_T の変化は特にみられない。このような傾向は他の h/L , H_1/d , B/L でも同様に確認されている。

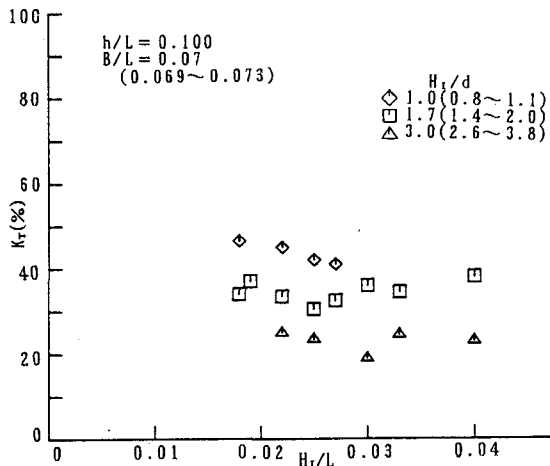


図-6 透過率と H_1/L の関係

以上のように透過率に及ぼす波形勾配の効果は h/L , H_1/d , B/L の条件を整えて判断すると従来言われているほど大きくはなく、透過率に及ぼす効果は H_1/L よりも H_1/d , B/L が卓越することが明らかになった。

また、 B/L , H_1/d はいずれも構造物のスケールと波

のスケールの比を表わしたもので、 B/L は水平方向、 H_1/d は鉛直方向のスケールの比を表わすものである。これに対して K_T に対する影響度の小さい H_1/L は入射波の特性を表わすパラメータである。

(4) 透過率算定式の検討

以上のように透過率に及ぼす各無次元量の影響度は H_1/L よりも H_1/d , B/L の方が大きいことから透過率を式(4)のように記述する。

$$K_T = C (H_1/d)^\beta (B/L)^\gamma \quad \dots (4)$$

ここで、 C , β , γ は B/L , H_1/d に対しては定数である。しかし式(4)中には h/L , H_1/L が含まれていないので C , β , γ は h/L , H_1/L の関数になるものと考えられる。

次に式(4)の C , β , γ を求めるため、両辺の対数を取り、次のように置換する。

$$\log K_T = \log C + \beta \log (H_1/d) + \gamma \log (B/L) \quad \dots (5)$$

$\log K_T = Y$, $\log C = A$, $\log (H_1/d) = X$, $\log (B/L) = Z$ とすると次式のようにおける。

$$Y = A + \beta X + \gamma Z \quad \dots (6)$$

次に式(6)の残差を取り、これの2乗の和をそれぞれ A , X , Z で偏微分し、これらの極値が0となるよう三元マトリクス方程式を解いて、多変量解析により C , β , γ を求める。

そこで全データを波形勾配ごとに57種類に分類し、さらにこれを値の近い範囲で、例えば $H_1/L=0.010 \sim 0.012$, $0.013 \sim 0.015$ などにグループ化し、比水深別にこれの多変量解析を行ない、 $h/L=0.084$ で5個、そして $h/L=0.100$, 0.126 , 0.169 でそれぞれ7個、合計26個の C , β , γ を得た。

1) C について

図-7は前述の方法で求められた C と H_1/L の関係を表わしたものである。この図よりいずれの比水深でも H_1/L の増加にともなって C は指数関数的に減少し、その値は比水深が大きいほど大きくなる。しかし比水深がある値以上になると C にあまり差はなくなるようであり、この場合も $h/L=0.126$ と 0.169 ではほとんど C に差は見られない。

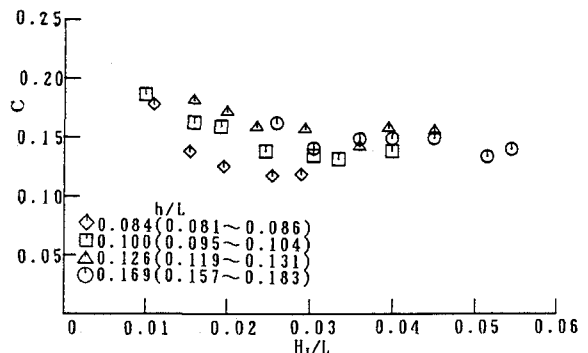


図-7 C と H_1/L の関係

そこで C と H_1/L の間に式(7)のような関数関係を仮定し、先と同じく比水深毎に最小2乗法を用いて係数 a_1 , b_1 を求めると以下のような結果が得られた。

$$C = a_1 (H_1/L)^{b_1} \quad \dots (7)$$

ここで, $h/L=0.084$	$a_1=0.026$	$b_1=-0.42$
$h/L=0.100$	$a_1=0.058$	$b_1=-0.25$
$h/L=0.126$	$a_1=0.090$	$b_1=-0.16$
$h/L=0.169$	$a_1=0.088$	$b_1=-0.16$

なお比水深別の回帰式に対する相関係数は, $h/L=0.084, 0.100, 0.126, 0.169$ においてそれぞれ0.95, 0.95, 0.80, 0.69を示し, ほぼ良好な相関性を持っている。

2) β について

図-8は比水深ごとに $|\beta|$ と H_1/L の関係を示したもので, いずれの比水深でも H_1/L の増加につれて $|\beta|$ は単調に大きくなり, かつ比水深による $|\beta|$ の差もあまり大きくないことがわかる。

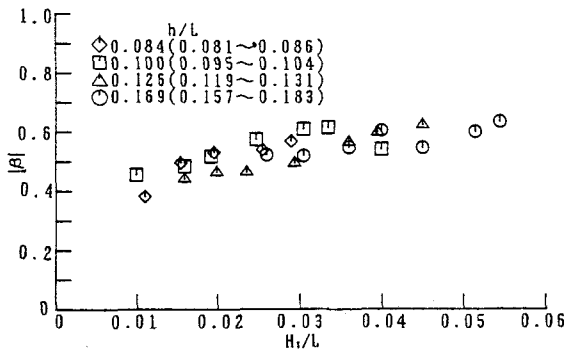


図-8 $|\beta|$ と H_1/L の関係

そこで, $|\beta|$ と H_1/L の間に線形関係を仮定し, 回帰式を求めると次式を得た。

$$\beta = a_2 + b_2 (H_1/L) \quad \dots (8)$$

ここで, $a_2 = -0.41$ $b_2 = -4.2$

この回帰式に対する相関係数は0.81で, 相関は良好である。

3) γ について

図-9は比水深ごとに $|\gamma|$ と H_1/L の関係を示したもので比水深にかかわらず H_1/L の増加にともなって $|\gamma|$ は直線的に大きくなり, そのうえ比水深による $|\gamma|$ の差もほとんど認められない。

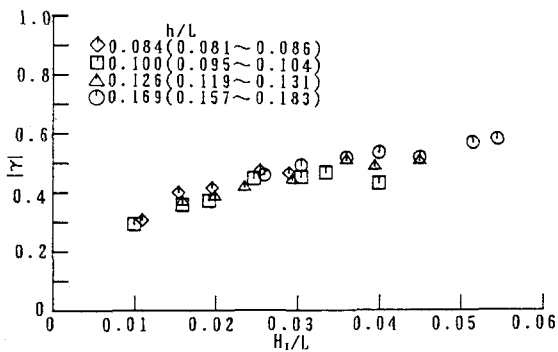


図-9 $|\gamma|$ と H_1/L の関係

そこで β と同様, $|\gamma|$ と H_1/L の間に線形関係を仮定し, 次式の関係を得た。

$$\gamma = a_3 + b_3 (H_1/L) \quad \dots (9)$$

ここで, $a_3 = -0.29$ $b_3 = -5.5$

この回帰式に対する相関係数は0.92で, 非常に良好

な相関関係を有している。

以上のように次元解析に基き式(4), (7), (8), (9)を得, これにより $h/L, H_1/L, H_1/d, B/L$ の値が知れば K_T の計算が可能となった。

5. 透過率の算定式

前節で得た結果を整理するとテトラポッドを用いた直立堤の透過率は次のように表わすことができる。

$$K_T = C (H_1/d)^\beta (B/L)^\gamma \quad \dots (10)$$

$$C = a_1 (H_1/L)^{b_1}$$

$$h/L=0.084 \quad a_1=0.026 \quad b_1=-0.42$$

$$h/L=0.100 \quad a_1=0.058 \quad b_1=-0.25$$

$$h/L=0.126 \quad a_1=0.090 \quad b_1=-0.16$$

$$h/L=0.169 \quad a_1=0.088 \quad b_1=-0.16$$

$$\beta = -0.41 - 4.2 (H_1/L)$$

$$\gamma = -0.29 - 5.5 (H_1/L)$$

ここで, H_1 : 入射波高 L : 入射波長 d : プロットの代表長さ B : 堤体幅

そこで式(10)の計算による透過率と実験で得られた透過率を照合することとし, すべてのデータを縦軸実験値, 横軸 計算値で示したものが図-10である。

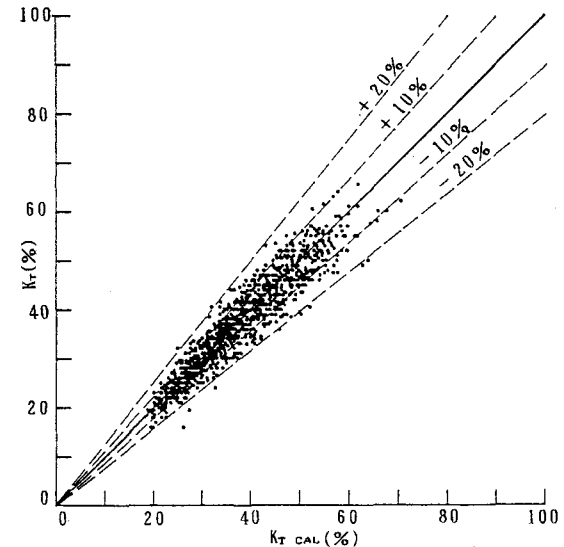


図-10 透過率の実験値と計算値の比較

プロットはおおむね線上に沿い, 一定の傾向を示しているがこの結果を詳細に分析するため誤差の頻度分布を調べた。

図-11は実験透過率(K_T)と計算透過率(K_{TCAL})の差を K_{TCAL} で除し, 誤差の割合の分布を示したもので, 総個数は1019個である。

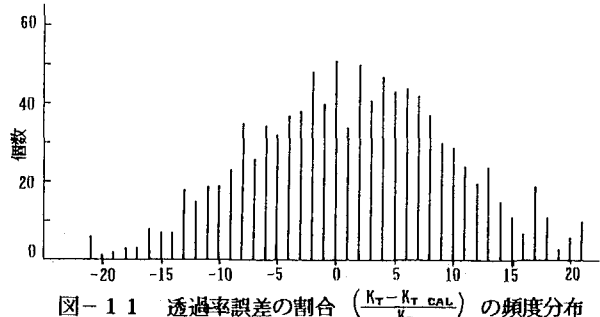


図-11 透過率誤差の割合 $(\frac{K_T - K_{TCAL}}{K_T})$ の頻度分布

図より、誤差の割合の分布はほぼ正規分布を呈しており、特に偏りは見られない。このうち、誤差の割合が±10%にあるものが780個あり、これは全体の76.5%にあたる。

また±15%には全体の92.2%にあたる940個が存在する。

次に h/L , H_1/L , H_1/d , ならびに B/L について、誤差の分布特性を検討したが、特に取り上げるべき特徴は見出せなかった。

このように式(10)による計算値は実験値をおおむね良く表わしているが、やや外れる部分も認められる。この原因の1つは C , β および γ 式の決定において対数化による直線回帰や、やや広がりや曲りのある分布をそれぞれ1本の回帰式で表現したことなどが考えられる。

しかしこの式は複雑な透過現象を支配する重要な因子を式中に含み、かつ透過率そのものが現実的にはある程度の幅をもつことを許容されるならば簡潔な表記であることに加え、おおむね妥当な数値を与えるものであることからこの計算式が規則波におけるテトラポッド直立堤の透過率を算出する式として適当なものと考える。

6. 結 言

規則波を用いて直立ブロック堤を対象に数多くの透過率の実験を行ない、入射波の大きさとブロックスケールなどについて考察し、次の結論を得た。

(1) 直立ブロック堤の透過率は H_1/d , B/L (ただし H_1 : 入射波高, L : 入射波長, d : ブロックの代表長さ, B : 堤体幅) に大きく支配され、これらの増加に対し、透過率は指数関数的に減少する。

(2) 透過率に対し従来、支配的とされてきた波形勾配の影響は H_1/d , B/L を固定するとそれほど大きくない。

(3) テトラポッド模型による実験結果から透過率算定式として式(10)を得た。

今後はブロック積み傾斜堤に対してブロックスケールの効果に関する同様の実験を行なうとともに、不規則波を対象に透過率の評価方法も含めさらに研究を進めたい。

最後に、本研究を進めるにあたり貴重な助言と協力をいただいた大阪工業大学後野正雄講師に深甚の謝意を表わすとともに、実験を担当された過年度の大阪工業大学卒業研究生諸氏ならびに本稿の取りまとめに多いに協力された大阪工業大学大学院生菅 智浩君に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 富永正昭・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, 1969.
- 2) 近藤徹郎: 透過性防波堤の伝達波, 第16回海岸工学講演会講演集, 1969.
- 3) 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, 1975.
- 4) 富永正昭・九津見生哲: 海岸堤防の消波工の規模と消波効果, 第19回海岸工学講演会論文集, 1972.