

透過性構造物による波浪変形実験におけるレイノルズ数の影響

Effect of Reynolds Number on Model Experiment of Wave Transformation by Permeable Breakwaters

井田 康夫*・小林 悟**・萩原 照央***

Yasuo Ida, Satoru Kobayashi and Teruo Hagihara

Effect of Reynolds number on model experiment of wave transformation was examined for permeable breakwaters with precast concrete armour unit in shallow water region. Transmission coefficient, K_T increases exponentially and linearized friction coefficient, f decreases exponentially with an increase in Reynolds number. It is necessary to give full consideration to Reynolds number for calculation and model experiment of wave transformation.

Keyword : Linearized friction coefficient, Model experiment, Permeable breakwater, Reynolds number

1. 緒言

狭小な国土しか保有していないわが国にあって「沿岸域」は大いなる恵みであり、その効用は計り知れない。この貴重な領域に目的、形状、規模の異なる多様な透過性構造物が建設され、地域の社会・経済活動や豊かな人間生活の実現に貢献している。今後も環境面に配慮した多くの事業が沿岸域で展開されようとしているが、ハード面の整備において透過性構造物の重要性はさらに増すものと思われる。しかしこれらの構造物の計画・設計段階で必要な波浪変形の予測手法は確立されているとは言い難い。この予測手法には理論に基づく計算^{1), 2)}と水理模型実験があるが、前者は複雑な繰返し計算を必要としたり、計算上重要な要素となる抵抗係数の算定に問題を残している。一方後者は空隙が小さくなった場合の実験においてレイノルズ数の影響について指摘^{3), 4)}されているものの粘性の効果について具体的な取扱いが不明である。

著者らは数年前から透過性構造物による波浪変形の予測に際して、簡便な予測手法の開発を企図し、直立式ブロック堤を対象に多数の透過率実験を行なった。その結果、線形抵抗係数が波と空隙の大きさの相対比ならびに粒径レイノルズ数の関数であることを明らかにし、透過率の算定式を示した。そしてこの研究の経緯から一般にフルードの相似則によって行なわれる波浪変形実験においては、直接考慮されることの少ない粒径レイノルズ数が、波浪変形を考える上で極めて重要であり、特に 10,000 以下の低レイノルズ数領域においては過小な変形しか出現しないことから実験結果の解釈に慎重な判断が求められることを提起した^{5), 6), 7)}。

そこで本論文は粒径レイノルズ数が波浪変形におよぼす影響を厳密に検証するため、入射波ならびに構造特性(堤体形状、ブロック形状)は相似であるが、大きさが可能な限り異なる 4 種類の直立ブロック堤を対象に透過率の実験を行ない、

①粒径レイノルズ数が波浪変形におよぼす影響

②粒径レイノルズ数と線形抵抗係数の関係

③既往の透過率算定式と実験値の比較

について検討を加えたものである。

2. 透過性構造物による波の変形

2.1 透過率算定式

空隙を内包する構造物による入射波の変形の程度は一般に透過率、反射率で表され、多くの研究成果が報告されているがここでは図-1に示すような直立ブロック積み堤における非越波時の透過率の算定が可能な既往の研究を整理し、これを表-1に示す。

この表において式(3)は傾斜堤を対象にしたものであるが、水面部の堤体幅を用いて、直立堤の場合と比較する。(なお各記号の添字は原文通り記載)

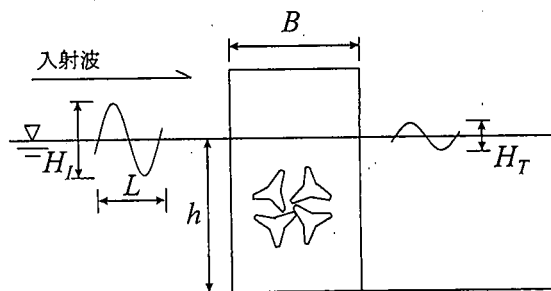


図-1 直立式ブロック積み堤

*正 会 員 大阪工業大学工学部土木工学科 (535 大阪市旭区大宮)

**正 会 員 (株)東光コンサルタンツ大阪支店

***学生会員 大阪工業大学大学院工学研究科

2.2 波の変形とレイノルズ数

一般に狭い空隙内で流体運動が行われるとき、レイノルズ数とその運動や、運動のもたらす結果に大きく関係することはよく知られている。しかし透過性構造物における波変形に関しては、一般的に重力および慣性力が他の力よりも卓越する現象であり、レイノルズ数が直接論議されることは少なく、表-1の式(1)、式(2)および式(3)にも直接的には反映されていない。

しかしブロック構造の空隙中の流体運動において、波の規模や水粒子速度と、空隙の形や大きさの関係によっては粘性の効果を考慮する必要があり、Delmonte³⁾が球積み堤による実験結果から、レイノルズ数の重要性を指摘しているし、服部・堺⁴⁾もブロック積み防波堤の実験結果から、入射波に関するレイノルズ数が波高伝達率に関係すると述べている。

さらに著者らはこのような透過現象におけるレイノルズ数の重要性に着目し、表-1の式(4)で線形抵抗係数の関数として粒径レイノルズ数を位置付け、透過体による波の変形を取り扱う際の一つの方向性を示している。

3. レイノルズ数を考慮した波浪変形実験

3.1 実験の目的

透過性構造物による波の変形は、著者らの研究によれば2.1で述べたように、波のスケールに対する空隙の大きさの相対比(H/d')と粒径レイノルズ数(Re)に支配される。

すなわち、 H/d' が大きいほど、また Re が小さいほど透過抵抗を増し、波は大きく変形する。しかしながら波変形におよぼす Re の効果はまだ充分明らかになっていない。

そこで本実験は直立ブロック積み堤を対象に H/d' の値を固定して入射波ならびに構造特性(堤体形状、ブロック形状)を相似とし Re のみを変化させた4種類の実験条件を設定して透過率の実験を行ない、レイノルズ数が波変形におよぼす影響を調べることを目的として実施した。

3.2 実験概要

(1)実験装置および方法

実験は長さ50m、高さ1.2m、幅0.8mの2次元水槽を用い、これの中央付近にテトラポッド模型を金網で被覆した直立の堤体を構築し、越波しない条件で所定の入射波を作用させて透過率を求めたものである。透

表-1 透過率(K_T)の算定式

発表者	式形	式番
沼田 ⁹⁾ (1975)	$K_T = 1 / \{ 1 + 1.184 (B/d)^{0.895} (H/L)^{0.5} \}^2$ B : 堤体幅, d : ブロック高さ, H : 入射波高, L : 波長	(1)
三浦・遠藤 ¹⁾ (1977)	$K_T = 1 / [1 + e^{[0.344 (B/d) + 0.099]} \times (H/L)^{[0.046 (B/d) + 0.377]}]^{1/[0.046 (B/d) + 0.277]}$ B : 堤体幅, d : ブロック高さ, H : 入射波高, L : 波長	(2)
竹田・及川・宮地・坂本・上西 ¹⁰⁾ (1983)	$K_T = 1 / (1 + 0.32 K_A^{0.75} \sqrt{H_i/L_i})^2$ (傾斜堤) $K_A = \frac{\alpha(1-\eta)B}{\beta d}$, η : 空隙率 ($\eta = 0.50$), α, β : ブロック形状を表す係数 ($\alpha = 2.69, \beta = 0.278$) B : 水面部堤体幅, d : ブロック高さ, H_i : 入射波高, L_i : 波長	(3)
著者ら ⁶⁾ (1992)	$K_r = \frac{l}{\left\{ \left(1 + \frac{\sigma B f}{2 \varepsilon \sqrt{gh}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma B (s + \varepsilon')}{2 \varepsilon \sqrt{gh}} \right)^2 \right\}^{1/2}}$ $f = 200 (H_i/d') / Re^{0.5}$ σ : 角周波数, B : 堤体幅, ε : 空隙率, g : 重力加速度, h : 水深, s : 慣性係数, H_i : 入射波高, d' : ブロックの空隙代表径, Re : 長波の水平水粒子速度(u)を用いた 粒径レイノルズ数 ($= u \cdot d' / \nu$) ν : 水の動粘性係数	(4)

過波高は堤体後面から4m離れた位置で、水槽側面に貼付したスケール(最小目盛1mm)上の水位変動をビデオ画像から測定し、入射波高は同位置における無堤時の値とした。なお各ケースとも2回ずつ実験を行ない、透過波高の平均値を用いて透過率を算出した。

(2)実験条件の設定とその種類

本実験の目的に照らし、実験条件の設定は最も肝要な事柄であるが、実験装置の規模と能力ならびに模型の種類と量を勘案し、可能な限り広範な粒径レイルズ数の領域が得られるよう次のように行なった。

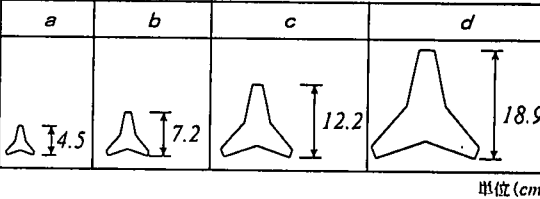


図-2 テトラポッド模型

まず図-2に示すテトラポッド模型のうち、最小模型a(ブロック高さ $d=4.5\text{cm}$ 、空隙代表径 $d'=2.9\text{cm}$)を用いた実験条件(設置水深 $h=20\text{cm}$ 、入射波高 $H_i=4.15\text{cm}$ 、波長 $L=183\text{cm}$ 、周期 $T=1.46\text{sec}$ 、堤体幅 $B=35\text{cm}$)を設定し、これをTYPE:Aの実験とする。この場合波形勾配は $H/L=0.023$ 、波高・空隙代表径比は $H/d'=1.43$ 、粒径レイノルズ数は $Re=4,300$ である。

次に模型 b の大きさが a の 1.6 倍であることから h , H_1 , L , B を同率で拡大し, $TYPE : A$ と H_1/L , H_1/d' が等しく, $Re=8,500$ となる $TYPE : B$ の実験条件を設定する。同様に模型の大きさが a の 2.7 倍, 4.2 倍となる $TYPE : C$, $TYPE : D$ の実験条件を設定し, Re が 19,600, 38,600 の場合の実験を行なった。

これらの実験諸元を表-2に, 実験断面を図-3に示す。

表-2 実験諸元

TYPE		A	B	C	D
実験倍率	N	1	1.6	2.7	4.2
入射波特性	設置水深 h (cm)	20	32	54	84
	入射波高 H_1 (cm)	4.15	6.58	11.35	17.80
	周期 T (sec)	1.46	1.86	2.37	3.00
	波長 L (cm)	183	290	482	790
構造特性	ブロック高さ d (cm)	4.5	7.2	12.2	18.9
	空隙代表径 d' (cm)	2.9	4.6	7.9	12.1
	堤体幅 B (cm)	35.0	56.0	94.5	147.0
h/L		0.11			
H_1/L		0.023~0.024			
H_1/d'		1.43~1.47			
Re		4,300	8,500	19,600	38,600

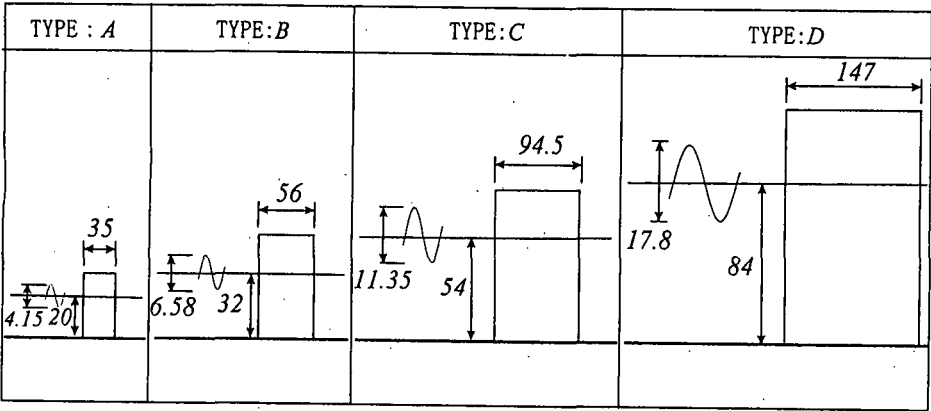


図-3 実験断面 (単位 cm)

3.3 実験結果

実験の結果を表-3に示す。

表-3 透過率の実験結果

TYPE	A	B	C	D-1	D-2
実験倍率 N	1	1.6	2.7	4.2	
レイノルズ数 Re	4,300	8,500	19,600	38,600	
入射波高 H_1 (cm)	4.15	6.58	11.35	17.80	
透過波高 H_T (cm)	1.08	1.93	3.19	6.78	6.50
透過率 K_T (%)	26	29	28	38	36

表中, $TYPE : D$ の実験においては使用したブロック模型が極めて大きく, 堤体の構築に際し空隙が最小となるよう充分慎重に積み上げたが, 水槽の側面, 底面に接する部分を均質な構造にすることは難しい。このため一度堤体を構築し, 透過波高を2回測定した後, 堤体を解体して, 再構築し, 新たな実験を付け加えたため, $D-1$, $D-2$ の実験結果を併記している。

3.4 考察

(1) 実験スケールの相違による透過率の変化

透過性構造物による波の変形は H_1/d' に大きく依存し, Re にも大きく関係することは既に述べた。そこで, H_1/d' の値を固定しつつ4種の規模の異なる透過率の実験を行ない, 実験スケールの相違による透過率の変化を見るため図-4を作成した。

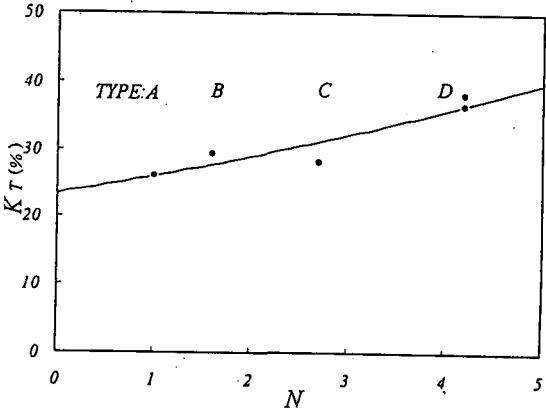
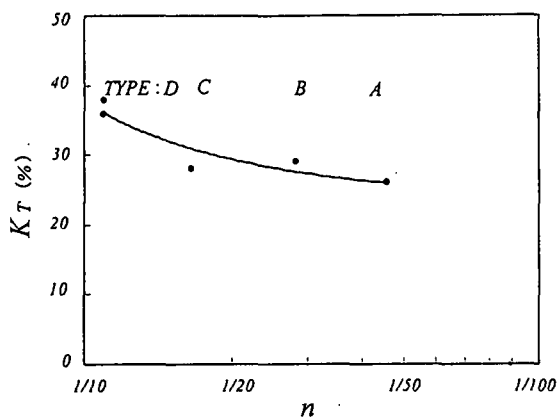


図-4 透過率 (K_T) と実験倍率 (N) の関係

同図より透過率は一定の関係にあり, 明らかに実験倍率の増大にともなって透過率は大きくなっている。このことは従来指摘されている透過率を支配する諸量, すなわち H_1/L , B/L , B/d などの値が同じであっても, 透過率は

一定とならず, 模型の規模が大きく関係することを示している。

また一般に波変形に関する水理模型実験は, 現地の断面, 寸法をフルードの相似則により所定の実験寸法に縮小して行なわれることから, 図-4の結果は現地の断面, 寸法を異なる実験縮尺 (n) でモデル化した場合の実験結果と考えることができる。いま仮に現地を 6.3ton 型テトラポッド堤 ($d=2.07m$) と想定すると, $TYPE : A$ から $TYPE : D$ までの実験縮尺は $1/11 \sim 1/46$ の範囲にあり, 図-5のようになる。



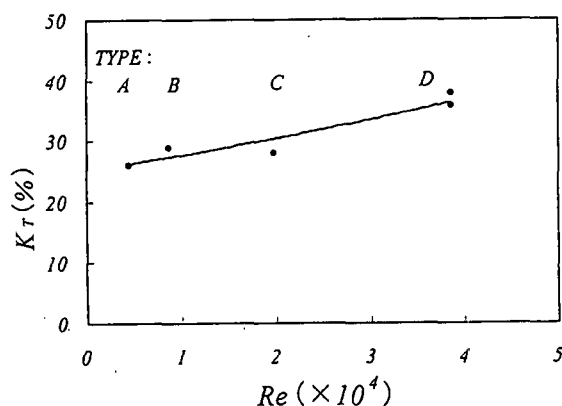
図－5 透過率(K_T)と仮想の実験縮尺(n)

この縮尺の想定によると $1/11$ と $1/46$ の場合の透過率の差は最大 12% もあり、縮尺率が大きくなるほど透過率は小さくなっている。つまり、縮尺の違いにより波の変形程度が明らかに異なることが認められる。

以上図－4、図－5の結果から、ブロック積み堤のような構造物を対象とした波変形の模型実験を行なうに際し、実験縮尺の選定は重要な問題であり、適正な縮尺が採用されているかどうかはその実験の結果と判断に大きな影響をもたらすことが判明した。

(2) 実験スケールと粒径レイノルズ数

一般に狭い空間で行なわれる流体運動は多少にかかわらずレイノルズ数の影響を受ける。本実験の場合も前項で述べた実験スケールによる透過率の差異は、各 TYPE とも入射波の波形勾配や波高・空隙代表径比が等しいことから、この透過率の有意な差は粒径レイノルズ数に起因するものと考えられる。そこで実験結果を透過率と粒径レイノルズ数の関係として表したものが図－6である。



図－6 透過率(K_T)と粒径レイノルズ数(Re)

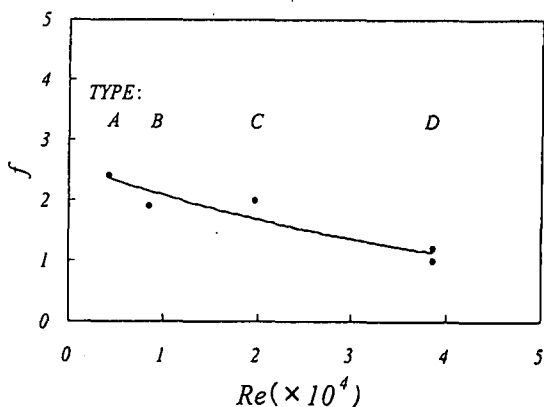
同図より、 K_T と Re は一義的な関係があり、 Re の増大とともに K_T が指数関数的に大きくなることがわかる。

次に透過率を抵抗係数との関係において検討する。この場合の抵抗係数は直立型の透過性構造物が波が通過する際、堤体に生じる抵抗を衝突時の瞬間的なものと、構造物を透過中に生じる継続的なものとを合算した線形的な総抵抗を表す線形抵抗係数(f)とし、粒径レイノルズ数(Re)との関係を表－4 および図－7に示す。

f は 2.1 の式(4)に実測値 K_T と、この場合の実験条件の諸値を代入して算出したもので、空隙率 $\varepsilon=0.5$ 、慣性係数 $s=1.2$ とした。

表－4 線形抵抗係数(f)と粒径レイノルズ数(Re)との関係

TYPE	Re	f
A	4,300	2.4
B	8,500	1.9
C	19,600	2.0
D-1	38,600	1.2
D-2		1.0



図－7 線形抵抗係数(f)と粒径レイノルズ数(Re)

同図より、粒径レイノルズ数の増加とともに線形抵抗係数が指数関数的に減少していることがわかる。なお、 f の値は本実験では波高・空隙代表径比(H/d')が 1.43 であり、著者らが参考文献^{5),6)}で示した H/d' が 1.43 の場合の f と比較してもほぼ同様の数値範囲にある。

以上のように図－6 および図－7 の結果から、本実験のような透過性構造物による波の変形は、低レイノルズ数領域においては過小に評価することになり、規模の大きい実験の結果や現地の状況とは様相を異にすることに留意する必要がある。

(3) 既往の透過率算定式による計算値と実験値の比較

透過性構造物による波変形の研究は、構造物の建設実績の増加とともにかなり以前から行なわれており、多くの透過率、反射率の算定式が提案されている。その中で本実験のような直立ブロック積み堤における

非越波時の透過率算定式として2.1に式(1)から式(4)を示した。

そこでTYPE : A, B, CおよびDの各実験条件を、これらの算定式に代入して透過率の計算値(K_{Tcal})を求め、実験値(K_{Texp})と比較を行なった。この結果を表-5に示す。そして透過率と粒径レイノルズ数の関係を図-8に、また透過率の計算値(K_{Tcal})と実験値(K_{Texp})の比較を図-9に示す。これらの表、図より次のことが考察される。

表-5 透過率の計算値(K_{Tcal})と実験値(K_{Texp})

TYPE	計算値 (K_{Tcal})				実験値 (K_{Texp})
	式(1)	式(2)	式(3)	式(4)	
A	22	33	33	17	26
B				22	29
C				28	28
D-1				33	38
D-2					36

(単位: %)

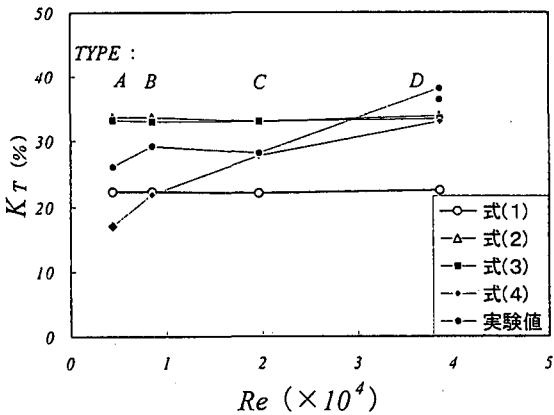


図-8 透過率(K_T)と粒径レイノルズ数(Re)

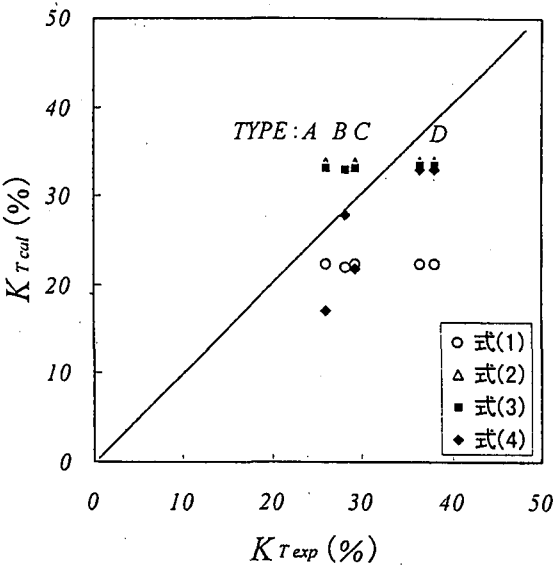


図-9 透過率の計算値(K_{Tcal})と実験値(K_{Texp})

(a)計算値

①式(1)、式(2)および式(3)による計算値はレイノルズ数に変数でないため、実験TYPEにかかわらず、透過率は不変で、それぞれ22%、33%および33%と一定値になっている。

②式(1)の透過率は22%であるがこれに比べ、式(2)と式(3)の計算値はいずれも11%大きくなって33%となり、この両式の計算値はこの実験の範囲では一致している。

③式(4)による計算値はTYPE : AからTYPE : Dまで粒径レイノルズ数の増加にともなってそれぞれ17%、22%、28%、33%と順に大きくなっている。

このように式(1)～式(3)と式(4)は変数としてのレイノルズ数の有無が計算値に大きな影響を与えている。

(b)透過率の計算値と実験値の比較

式(1)～式(4)による透過率の計算値(K_{Tcal})と実験値(K_{Texp})の比較を図-8および図-9によって行ない、次の結果を得た。

① K_{Texp} は Re の増加にともない、大きくなっているが、これと同様の K_{Tcal} の変化は式(4)による値のみに認められる。ただし、式(4)による K_{Tcal} もTYPE : Aでは K_{Texp} と大きな差が見られる。この理由は式(4)の線形抵抗係数算定式 $f=200(H/d')/Re^{0.5}$ により透過率におよぼす粒径レイノルズ数の影響を包括的に表しているが、粒径レイノルズ数の小さい領域の流体抵抗が充分反映されていないためと考える。

②式(1)による K_{Tcal} はすべて K_{Texp} より小さく、特に Re の大きい領域における両者の差は大きい。

③式(2)および式(3)による K_{Tcal} はTYPE : A, BおよびCでは K_{Texp} より若干大きく、TYPE : Dでは逆に小さくなっているが、TYPE : Aを除いて両者の差は小さい。

以上のように透過率の計算値と実験値は充分な対応を示しているとはいえない。

4. 結言

透過性構造物による波浪変形の予測は、沿岸域に多様な構造物の建設が続けられる中、今後も重要でかつその機会も増えるものと思われる。このような予測に際し、流体場におけるレイノルズ数の効果を合理的に、そして簡潔な形で取り込むことは波の変形計算や水理模型実験などその予測手法にかかわらず、工学上重要である。

著者らは数年来、直立型ブロック積み堤における非越波時の透過率が、入射波と空隙の大きさの相対比(H/d')と粒径レイノルズ数(Re)に関係することを指摘しているところである。

本論では前者の相対比を一定に保ちつつ、後者の粒

径レイノルズ数が波の変形におよぼす影響を見極めるため、入射波および構造物の特性がすべて相似で、規模の異なる4種の実験断面を設定して透過率の実験を行なった。そして粒径レイノルズ数による透過率の変化を明らかにすると共に、既往の透過率算定式による計算値と実験値の比較を行なった。この結果を以下に要約する。

- (1) 透過率は入射波と空隙の大きさの相対比(H/d')が同じであっても実験の規模によって変化し、粒径レイノルズ数(Re)の増大とともに透過率はほぼ大きくなる。
- (2) 式(4)に示される線形抵抗係数(f)は粒径レイノルズ数の増大とともに小さくなる。
- (3) 既往の透過率算定式に実験条件を代入し、計算値の変化を考察したところ、式(1)~式(3)による計算値は粒径レイノルズ数の値にかかわらず一定の透過率を示し、実験値の変化傾向に追随しない。
- (4) 式(4)による計算値は算定式中、唯一粒径レイノルズ数の変化に対応する。しかし、粒径レイノルズ数の小さい領域(TYPE: A)においては計算値と実験値の対応は不十分である。

参考文献

- 1) Somchai Rojanakamthorn・磯辺雅彦・渡辺晃：
透過潜堤による波浪変形の解析モデル，海岸工学
論文集，土木学会，第36巻，pp.643-647，1989。

- 2) 泉宮尊司・古俣弘和・水上淳：透過性波浪制御構造物の線形抵抗係数および局所的反射率に関する研究，海岸工学論文集，土木学会，第37巻，pp.544-548，1990。
- 3) Delmonte, R.C. : Scale effects of wave transmission through permeable structures, Proc.13th.ICCE, pp.1867-1872, 1972.
- 4) 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，土木学会，pp.55-61，1973。
- 5) 榎木亨・井田康夫・後野正雄・菅智浩：ブロック積み消波堤の線形抵抗係数に関する実験的研究，海洋開発論文集，土木学会，vol.7, pp.155-159，1991。
- 6) 榎木亨・井田康夫・後野正雄・菅智浩：透過性構造物による波変形の模型実験の限界について，海岸工学論文集，土木学会，第39巻(2)，pp.616-620，1992。
- 7) 井田康夫・須貝輝博・小林悟：透過性構造物による波浪変形実験に関する信頼性と縮尺限界，海洋開発論文集，土木学会，vol.12, pp.91-96，1996。
- 8) 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，土木学会，pp.501-505，1975。
- 9) 三浦晃・遠藤茂勝：ブロック積み防波堤の波高伝達特性，第24回海岸工学講演会論文集，土木学会 pp.261-265，1977。
- 10) 竹田英章・及川研・宮地陽軸・坂本洋一・上西隆広：緩傾斜堤の波高伝達算定法に関する実験的研究，第30回海岸工学講演会論文集，土木学会，pp.400-404，1983。