

直立透過堤における実験スケールと透過特性

EXPERIMENTAL SCALE AND CHARACTERISTICS OF TRANSMISSION OF WAVE IN THE UPRIGHT PERMEABLE BREAKWATER

井田康夫¹・森松芳隆²・安井陽平³

Yasuo IDA, Yoshitaka MORIMATSU and Yohei YASUI

¹正会員 工博 大阪工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒535-8585 大阪市旭区大宮五丁目 16-1)

²学生会員 大阪工業大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒535-8585 大阪市旭区大宮五丁目 16-1)

³株式会社 森長組 (〒656-0595 兵庫県三原郡南淡町賀集 823)

Effect of Reynolds number on model experiment of wave transformation was examined for permeable breakwaters with a precast concrete armour unit in shallow water region.

Transmission coefficient, K_T increases by the increase in Reynolds number, Re and experiment magnification, N at logarithmic.

Then, linearized friction coefficient, f is decreased with the increase in Reynolds number, and transmission coefficient increases.

As a result of examining transmission coefficient in the field using the equation of the authors which is possible to calculation of transmission coefficient. Then, transmission coefficient becomes almost constant at $Re > 50 \times 10^4$ and it is about 50%.

Key Words : Permeable breakwater, experimental scale, transmission coefficient, linearized friction coefficient, Reynolds number

1. 緒言

沿岸域を有効に利用する上で透過性構造物の果たすべき役割は極めて大きく、環境面、コスト面に対する社会的要請に応えた多様な形式の構造物が建設されている。これらの計画、設計に際し波の変形予測は不可欠であり、理論に基づく計算や水理模型実験が用いられる。しかしながら両者ともいくつかの問題を残しており、予測手法が確立されているとは言い難い。このうち水理模型実験においては構造物内の空隙が小さくなった場合の粘性効果について具体的な取り扱いが不明である。逆に実験スケールが現地サイズに近くなった場合の波の変形についても十分な検討は行なわれていないようである。著者らは既報^{1), 2), 3), 4)}のように、透過性構造物による波の変形は、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)に支配されることを明らかにした上、直立ブロック積み堤を対象に、実験スケールを変えて透過率の実験を行ない、波変形におよぼす粒径レイノルズ数の影響を報告したが実験ケースが一例のみであり、明確にできなかった部分もある。そこで本論では実験スケールならびに粒径レイノルズ数の範囲を拡張

して3ケースについて透過率の実験を行ない、以下の考察を行なった。

- ①実験スケールならびに粒径レイノルズ数が透過特性におよぼす影響
- ②粒径レイノルズ数と線形抵抗係数の関係
- ③外挿法による現地における透過率の推定

2. 透過性構造物による波の変形

(1) 透過率算定式

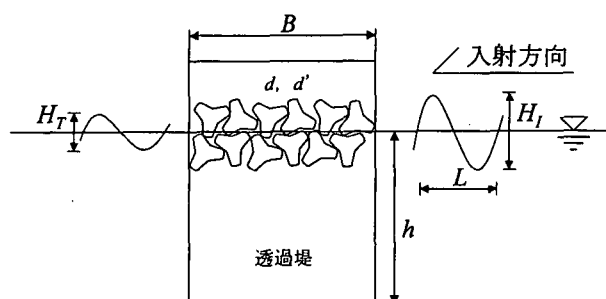


図-1 透過性構造物

著者らは長波領域において図-1に示すようなテトラポッド

ド模型を用いた直立ブロック積み堤を対象に行なった多数の透過率実験から式(1)に示す線形抵抗係数を用いた透過率の算定式を得ている。

$$K_T = \frac{l}{\left\{ \left(1 + \frac{\sigma B f}{2\varepsilon \sqrt{gh}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma B (s + \varepsilon^2)}{2\varepsilon \sqrt{gh}} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$
$$f = 289(H_l/d')/Re^{0.5}$$

ここに、 K_T : 透過率、 f : 線形抵抗係数、 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、 Re : 粒径レイノルズ数($u \cdot d'/\nu$)、 u : 長波の最大水平水粒子速度、 ν : 水の動粘性係数、 d' : 空隙代表径

この結果は透過性構造物による波の変形を考える場合、波と空隙の大きさの相対比、すなわち波高・空隙代表径比(H_l/d')と粒径レイノルズ数(Re)が極めて重要な因子であることを示している。

(2) 波の変形と粒径レイノルズ数

一般に狭い空隙内で流体運動が行なわれるとき、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が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、フルードの相似則を用いて模型実験が行なわれている。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、つまりレイノルズ数の効果を考慮する必要がある。*Delmonte*⁹⁾は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おり、服部・堺⁶⁾ら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。また、著者らは数多くの水理模型実験の結果から入射波高や構造物内の空隙が小さい場合、つまり実験の規模が小さい場合の実験結果はレイノルズ数の影響によって透過率が過小に評価されることを明らかにした。このように波の変形が粒径レイノルズ数に依存するならば、粒径レイノルズ数が極めて大きい領域(現地)における波の変形も重要な検討課題となる。

3. 実験概要

(1) 実験装置と方法

実験は長さ 50m、高さ 1.2m、幅 0.8m の 2 次元造波水槽と、長さ 80m、高さ 1.5m、幅 1.2m の 2 次元造波水槽を用いた。そして水槽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。入射波高は無堤時における同位置の波高とし、透過波高は堤体後面

から 4m 離れた位置で、容量式波高計により測定した。なお各ケースとも 2 回づつ実験を行ない、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

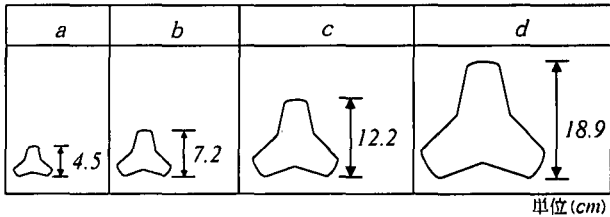


図-2 ブロック模型

表-1 実験波の諸元

TYPE		A	B	C	D
実験倍率 N		1	1.6	2.7	4.2
水深 h (cm)	①	18.0	28.8	48.6	75.6
	②	20.0	32.0	54.0	84.0
	③	20.0	32.0	54.0	84.0
入射波高 H _l (cm)	①	4.07	6.52	11.06	17.12
	②	4.48	7.18	12.25	18.73
	③	5.52	8.88	15.00	23.28
周期 T (sec)	①	1.40	1.77	2.30	2.87
	②	1.50	1.90	2.46	3.07
	③	1.50	1.90	2.46	3.07
波長 L (cm)	①	174.4	279.1	470.9	732.5
	②	197.4	315.8	533.0	829.1
	③	197.4	315.8	533.0	829.1
相対水深 h/L		①0.103, ②0.101, ③0.101			
波形勾配 H _l /L		①0.023, ②0.023, ③0.028			

実験スケールならびに粒径レイノルズ数が透過率におよぼす影響を厳密に検討するためには、波の変形に影響をおよぼすと考えられる諸量 H_l/d' 、 H_l/L 、 B/L 、 B/d などが一定のもとで、 Re を広範囲に設定した実験を行なう必要がある。そこで図-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 $d'=3.7\text{cm}$)を用い、設置水深 $h=18\sim20\text{cm}$ 、堤体幅 $B=33.3\sim37.7\text{cm}$ の直立ブロック積み堤を設け、非越波条件のもとで、入射波高 $H_l=4.07\sim5.52\text{cm}$ の 3 種類の波を作用させ、透過率を測定した。この実験を TYPE : A とする。そして模型 b、c、d の大きさが模型 a の 1.6、2.7、4.2 倍であることから水深、模型の大きさ、堤体幅、波長、入射波高がそれぞれ TYPE : A の 1.6 倍、2.7 倍、4.2 倍となるような TYPE : B、C、D の実験条件を設定し、3 種類の入射波と、4 種類の実験スケールについて実験を行なった。ここで、空隙代表径(d)とはテトラポッドを乱積みにした場合の空隙が 50% であることから、ブロック 1 個の体積と同体積の球の直径のことで、空隙の代表長さの一種である。

このように本実験は入射波ならびに堤体構造は相似であるが、大きさが異なる実験条件を設定し、粒径レイノルズ数による透過率の変化を調べたものである。

なお、実験に用いた波は全て規則波でその諸元を表一

1に、構造物の諸元を表-2に、実験断面を図-3に示す。

表-2 構造物の諸元

TYPE	A	B	C	D
実験倍率 N	1	1.6	2.7	4.2
ブロック高さ d (cm)	4.5	7.2	12.2	18.9
空隙代表径 d' (cm)	3.7	5.8	9.9	15.3
堤体幅 B (cm)	① 33.3	53.3	89.9	139.9
	② 37.7	60.3	101.8	158.3
	③ 37.7	60.3	101.8	158.3
相対堤体幅 B/L	0.191			
波高・空隙代表径比 H_i/d'	①1.12, ②1.23, ③1.52			
粒径レイノルズ数 Re	① 5900	11800	26200	50300
	② 6200	12300	27500	52100
	③ 7600	15200	33600	64700

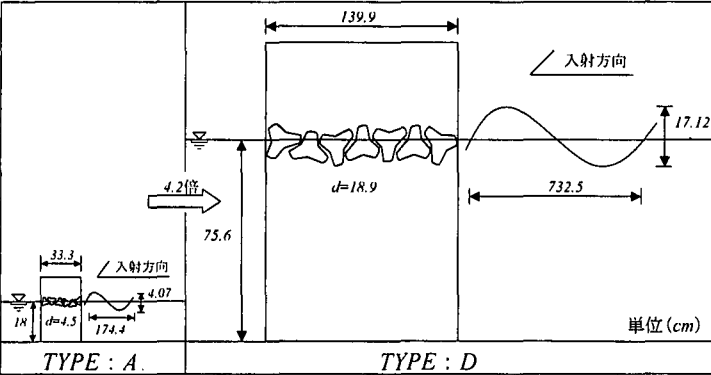


図-3 実験断面

4. 実験結果と考察

実験結果を表-3に示す。

表-3 実験結果

TYPE	A	B	C	D
実験倍率 N	1	1.6	2.7	4.2
粒径レイノルズ数 Re	① 5900	11800	26200	50300
	② 6200	12300	27500	52100
	③ 7600	15200	33600	64700
入射波高 H_i (cm)	① 4.07	6.52	11.06	17.12
	② 4.48	7.18	12.25	18.73
	③ 5.52	8.88	15.00	23.28
透過波高 H_T (cm)	① 0.73	1.29	3.39	4.47
	② 0.69	1.49	3.19	4.53
	③ 0.79	1.69	3.51	4.94
透過率 K_T (%)	① 17.8	19.8	30.6	26.1
	② 15.4	20.7	26.0	24.2
	③ 14.2	19.0	23.4	21.2

(1) 実験スケールの相違による透過率の変化

既に述べたように透過性構造物における波の変形は H_i/d' に大きく依存し、 Re にも大きく関係する。そこで、 H_i/d' 、 H_i/L 、 B/L 、 B/d の値を固定し、実験スケールの相違による透過率の変化を見るために実験倍率 (N) と透過率の関係を図-4に示した。

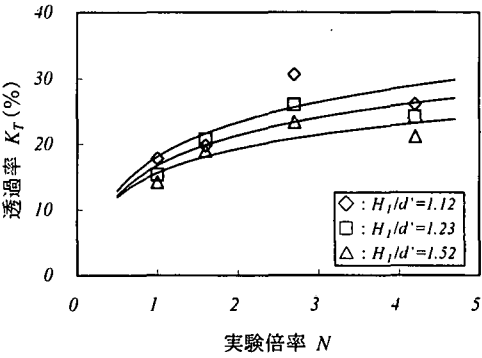


図-4 透過率と実験倍率

同図より、実験倍率の増大とともにおおむね透過率は大きくなっている。これは、従来指摘されている透過率を支配する諸量、すなわち H_i/d' 、 H_i/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、実験スケール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 型テトラポッド乱積み堤 ($d=2.07m$) と想定すると、TYPE : A から TYPE : D までの実験縮尺は 1/11 ~ 1/46 の範囲にあり、図-5のようになる。

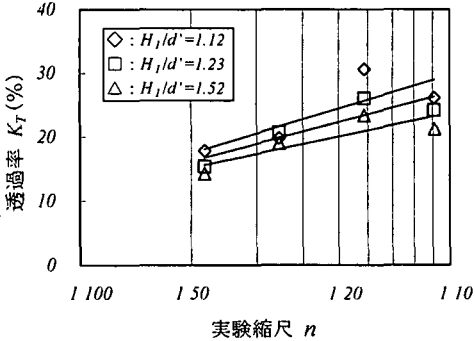


図-5 透過率と実験縮尺

この図によれば、実験縮尺 (n) が大きくなるほど透過率が大きくなっており、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。また、 n の増加に対する K_T の変化はほぼ直線的であり、この図が片対数グラフを使用していることから両者は対数関数的な関係と見ることができる。

以上の図-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、適切な縮尺

が採用されているかどうかで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) 粒径レイノルズ数と線形抵抗係数の関係

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、粘性すなわち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の違いによる透過率の差異は、各 TYPE とも H_1/d' , H_1/L , B/L , B/d などが等しいことから、粒径レイノルズ数による影響と考えられる。そこで透過率(K_T)と粒径レイノルズ数(Re)の関係を表したものが図-6である。

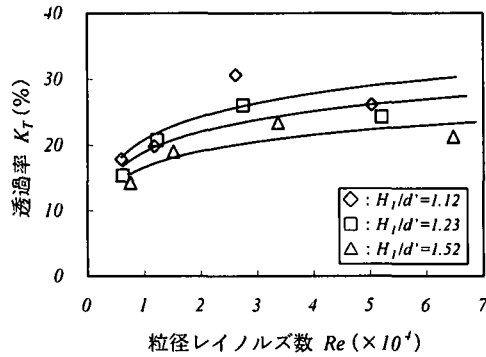


図-6 透過率と粒径レイノルズ数

この図から、粒径レイノルズ数(Re)の増大とともに透過率が大きくなることが明らかであり、 Re の小さい領域における K_T はかなり小さいことと、 $Re > 3 \times 10^4$ の領域において K_T の変化は小さいことに注意する必要がある。

次に透過率と線形抵抗係数(f)との関係を図-7に示す。線形抵抗係数とは透過性構造物を波が通過する際、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したものである。前述の式(1)に実験条件と透過率を代入することにより線形抵抗係数が算出できる。この際、 $\epsilon = 0.5$, $s = 1.2$ を用いた。

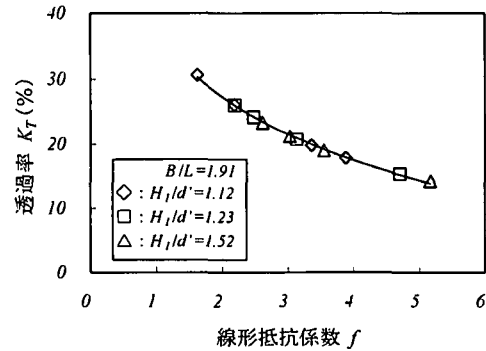


図-7 透過率と線形抵抗係数

同図より f の減少とともに透過率(K_T)は大きくなっていることが明らかに認められる。これは、構造物による

抵抗が小さくなると K_T が大きくなるということを表している。

さらに線形抵抗係数(f)と粒径レイノルズ数(Re)との関係を図-8に示す。

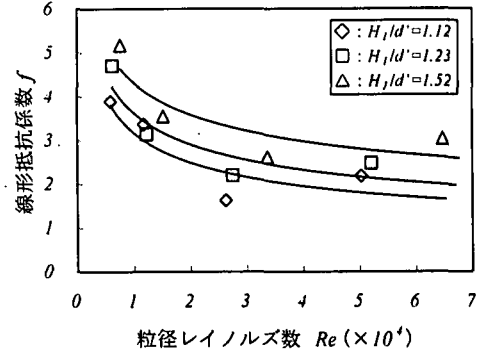


図-8 線形抵抗係数と粒径レイノルズ数

同図より、粒径レイノルズ数(Re)の増大とともに f は減少するが、この減少の割合は $Re = 3 \times 10^4$ を境に大きく異なる。

以上の図-6、図-7および図-8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粒径レイノルズ数の増大とともに線形抵抗係数(f)は減少し、 f の減少とともに透過率は大きくなるという関係が検証された。

(3) 外挿法による現地の透過率の推定

a) 透過率の実験値と計算値の比較

式(1)に実験条件をそれぞれ代入し、透過率の計算値(K_{Tcal})を求め、実験値(K_{Texp})と比較した。この計算において $\epsilon = 0.5$, $s = 1.2$ とした。

この結果を図-9に示す。

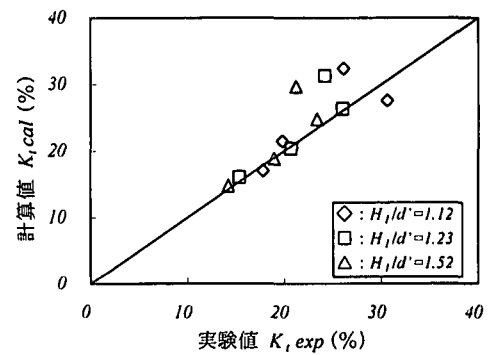


図-9 透過率の計算値(K_{Tcal})と実験値(K_{Texp})

この図から、計算値と実験値に若干の差はあるものの、式(1)は実験値と良い対応を示している。

この結果を基に式(1)を用いて前項と同様に現地を 6.3ton 型テトラポッド乱積み堤($d = 2.07m$)と想定し、現地における透過率について次の b), c) の検討を行なう。

b) 透過率と実験倍率ならびに実験縮尺の関係

TYPE:Aを実験倍率1とすると現地スケールはTYPE:Aの46倍に相当する。図-10はTYPE:A-③の実験条件を1~46倍し、各実験倍率における計算値 K_{7cal} の値を表したものである。

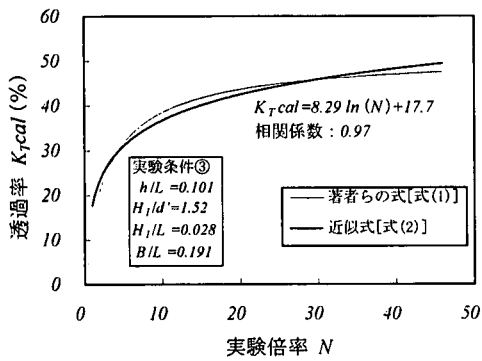


図-10 透過率と実験倍率

同図より、実験倍率(N)の増大とともに K_{7cal} は対数関数的に増加しており、次のように近似できる。この場合の相関係数は0.97である。

$$K_{7cal} = 8.29 \ln(N) + 17.7 \tag{2}$$

またTYPE:A-①および②も同様の計算を行ない、図-11にまとめた。

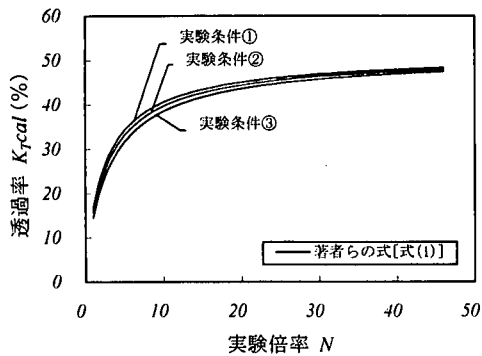


図-11 透過率と実験倍率

同図より、3つの実験条件とも実験倍率(N)の増大とともに K_{7cal} は対数関数的に大きくなり、 $N \approx 20$ より大きくなると K_{7cal} はあまり変化しないことが分かる。

次に、実験縮尺について検討する。現地を6.3ton型ブロックと想定し、これを実験縮尺1/1とするとTYPE:Aの実験縮尺は1/46に相当する。この場合の透過率と実験縮尺(n)の関係を示したものが図-12である。

この図から、実験縮尺が大きくなるほど透過率(K_{7cal})が大きくなり、 $n=1/1$ の場合では $K_{7cal} \approx 50\%$ 程度になることが分かる。

c) 粒径レイノルズ数と線形抵抗係数の関係

粒径レイノルズ数を現地スケールまで大きくすると透過率はどのように変化するかを検討するため、図-

13を作成した。

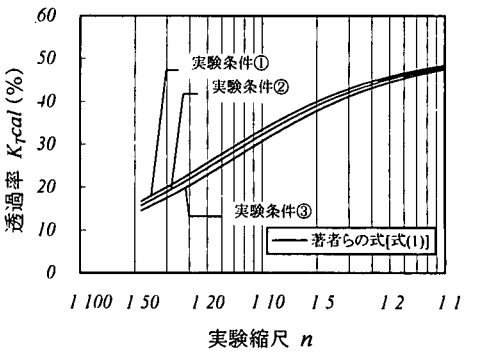


図-12 透過率と実験縮尺

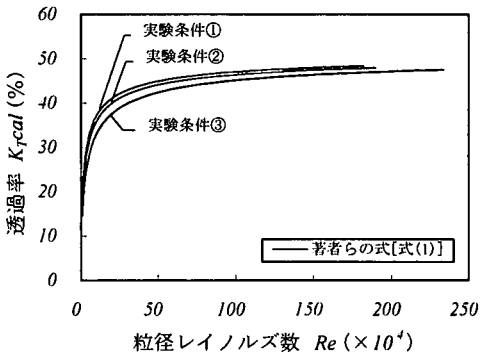


図-13 透過率と粒径レイノルズ数

図-13から、粒径レイノルズ数(Re)の増大とともに K_{7cal} が対数関数的に大きくなり、 $Re \approx 50 \times 10^4$ より大きくなると K_{7cal} はあまり変化しないことが分かる。

この場合の透過率と線形抵抗係数の関係を示したものが図-14である。

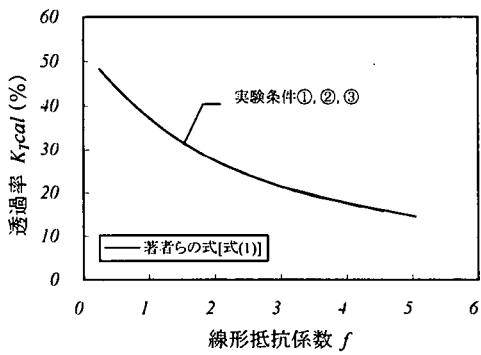


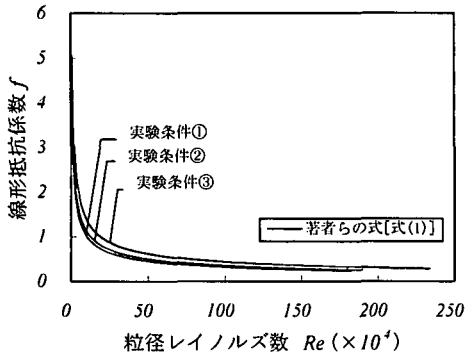
図-14 透過率と線形抵抗係数

同図より、線形抵抗係数の減少とともに K_{7cal} が大きくなることが分かる。

さらに、この場合の線形抵抗係数(f)と粒径レイノルズ数(Re)の関係を図-15に示す。

この図より、粒径レイノルズ数の増大とともに線形抵抗

係数が減少していることが分かる。また、 $Re \approx 50 \times 10^4$ より大きくなると f はほとんど変化しないことも分かる。



図一 15 線形抵抗係数と粒径レイノルズ数

以上のことから、現地の透過性構造物による波の変形にも粒径レイノルズ数(Re)の増大とともに線形抵抗係数(f)が減少し、 f の減少とともに透過率(K_{Tcal})は大きくなるという関係が認められる。

しかし、水理模型実験で実際に現地サイズに近い粒径レイノルズ数を用いることは極めて困難である。したがって、従来行なわれてきた水理模型実験の結果を現地に適用する際にはレイノルズ数を考慮した上で慎重に取り扱う必要がある。

5. 結言

透過性構造物による波浪変形の予測は沿岸域において多種多様な構造物が建設されている中、今後も重要でかつその機会も増えるものと思われる。

著者らは数年来、直立ブロック積み堤における非越波時の透過率は、入射波と空隙の大きさの相対比(H_i/d')ならびに粒径レイノルズ数(Re)に大きく関係すると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、入射波ならびに構造物の特性が

すべて相似で、大きさがそれぞれ違う実験条件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ともに、透過率算定式を用い、外挿法による現地における透過率の推定を行なった。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_i/d')や波形勾配(H_i/L)などが同じ場合でも実験倍率(N)や粒径レイノルズ数(Re)の増大によって透過率(K_T)は大きくなる。
- ②粒径レイノルズ数(Re)の増大とともに線形抵抗係数(f)は減少し、透過率(K_T)は増大する。
- ③外挿法による現地の透過率の推定の結果、 $Re \approx 50 \times 10^4$ より大きくなると線形抵抗係数(f)はほとんど変化せず透過率(K_{Tcal})はほぼ一定となり今回の実験条件では50%程度になる。しかし、水理模型実験で実際に現地サイズに近い粒径レイノルズ数を用いることは極めて困難であり、従来行なわれてきた水理模型実験の結果を現地に適用する際にはレイノルズ数を考慮した上で慎重に取り扱う必要がある。

参考文献

- 1) 榎木亨・井田康夫・福田護：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、海洋開発論文集，土木学会，vol.6，pp.287-291，1990.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 井田康夫・小林悟・萩原照央：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，海洋開発論文集，土木学会，vol.13，pp.537-542，1997.
- 5) Delmonte, R.C. : Scale effects of wave transmission through permeable structures, Proc.13th.ICCE, pp.1867-1872, 1972.
- 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，土木学会，pp.55-61，1973.