

透過性構造物による波変形の模型実験の限界について

樫木 亨*・井田康夫**・後野正雄***・菅 智浩****

1. 緒 言

わが国の沿岸域は近年、ウォーターフロント利用の面から、積極的かつ高密度利用の時代を迎え、波浪制御のための透過性構造物はその重要度を増している。これらの構造物の計画・設計に際しては、波エネルギーの逸散を正確に見積る波変形の予測が不可欠である。このため従来、潜堤を対象に Somchai ら (1989), 泉宮ら (1989, 1990) が緩勾配方程式による波浪変形の解析を示しているが、エネルギー逸散を評価するために重要な、透過性構造物内での線形抵抗係数の検討が充分でない。一方、従前の水理模型実験による変形予測も、Delmonte (1972) 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ものの、モデルと大きく異なる現地の高レイノルズ数領域における予測手法に適用できるか疑問の残るところである。

そこで本論では、潜堤だけでなく、広く透過性構造物全般の波浪変形解析に重要な役割を果たす線形抵抗係数の実態を把握するため、これと波高・空隙代表径比との関係を検討し、次いで、レイノルズ数との関係を明らかにする。そして、線形抵抗係数の推定式を提示すると共に、波変形に関する模型実験の相似則とその限界について考察する。

2. 長波領域における線形抵抗係数

透過性構造物周辺の波浪場において、波の変形を基本的に取り扱うため、図-1 のようにモデルは水平床上の直立構造物とし、非越波状態を考える。

一般に、透過性構造物による波浪の変形の程度は、反射率、透過率で表わされることが多く、具体的な構造物に対するこれらの簡便な算出は設計、計画に携わる技術者からの要求も高い。反射率、透過率を求める方法は通常、図-1 に示す領域に分割し、各領域で速度ポテンシャル、圧力、分散関係式を表現する。そしてこれらを境

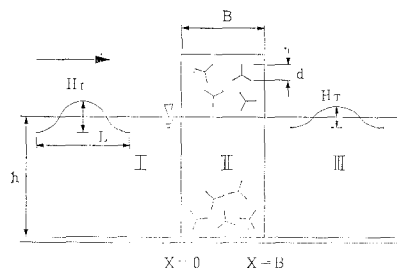


図-1 ブロック積み堤のモデルと記号の定義

界面 $X=0, B$ でそれぞれ接合する方法がとられるが、ここでブロックに作用する抗力項が非線形項となるため、何らかの方法で線形化が必要となる。このため、Sollitt ら (1972) は Lorentz の等価仕事則を用い、長波領域における透過率 K_T を次式で表わした。

$$K_T = \frac{1}{\left[\left\{ 1 + \frac{\sigma B f}{2\varepsilon \sqrt{gh}} \right\}^2 + \left\{ \frac{\sigma B (s + \varepsilon^2)}{2\varepsilon \sqrt{gh}} \right\}^2 \right]^{0.5}} \quad \cdots (1)$$

ここに、 h : 水深、 σ : 角周波数、 B : 堤体幅、 ε : 空隙率、 f : 線形抵抗係数、 s : 慣性係数、 g : 重力加速度である。

そこで、著者ら (樫木ら, 1991b) は式 (1) から線形抵抗係数を求め、長波領域における線形抵抗係数式として式 (2) を得た。

$$f = \frac{\varepsilon \sqrt{gh}}{\sigma B} \left\{ -2 \pm 2 \sqrt{\frac{1}{K_T^2} - \frac{\sigma^2 B^2 (s^2 + 2s\varepsilon^2 + \varepsilon^4)}{4\varepsilon^2 gh}} \right\} \quad \cdots (2)$$

式 (2) で用いられる慣性係数 s は、近藤 (1981) によると、石やブロック積みのように、空隙の大きさが構成材の個体の大きさと同程度の場合は式 (3) で示す範囲にあり、

$$1 \leq s \leq 1 + \varepsilon \quad \cdots (3)$$

テトラポッドの乱積み構造では $\varepsilon=0.5$ であるため、 $s=1.0 \sim 1.5$ となるが、泉宮ら (1990) はこの値を 1.1 として波浪変形解析に用いている。著者ら (樫木ら, 1991b) は、 s が $1.1 \sim 1.3$ の範囲では、線形抵抗係数との相関が微弱であることを示し、 $s=1.2$ を代表値としている。

* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 大阪工業大学講師 工学部土木工学科

*** 正会員 工博 大阪工業大学助教授 工学部土木工学科

**** 正会員 工修 基礎地盤コンサルタンツ(株)

また、式(2)には波長、堤体幅、空隙率は変数として含まれているが、波高ならびに空隙のスケールは考慮されていない。さらに、現地との対応を考える上でレイノルズ数も不可欠の要素である。したがって、これらの重要な諸量と線形抵抗係数の関係を明らかにする必要がある。

3. 実験方法

(1) 概要

実験の目的は式(2)により、透過性構造物の線形抵抗係数を求めることにあり、透過波高を測定し、透過率を算出した。実験装置は、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)を設けたもので、天端は越波させない高さとする。

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。

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、これを再生して読み取った。なお、実験はすべて2回ずつ行い、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、比水深(h/L)は0.08の一定とし、波形勾配(H_I/L)は0.011~0.030の範囲で12種類を選んだ。この比水深は長波の限界値よりやや大きい、長波近似として扱う。水深は30~45cm、周期は2.0~2.6secの範囲にある。

堤体は表-1に示す4種類のテトラポッドで構築し、堤体幅は $B=10\sim200$ cmの範囲にある3~4種類とした。表中の空隙代表径(d')はブロック1個と同体積の球径で、空隙のスケールを表わしたものである。

表-1 テトラポッド

高さ(d)	空隙代表径(d')
4.5 cm	2.9 cm
7.2	4.6
12.2	7.9
18.9	12.1

これは流体の運動がブロックの空隙において行われるものであり、波の変形を表わす諸量としては、ブロックの代表径より、空隙の代表径の方が適切であると考えられる。

これを用いると、波高・空隙代表径比(H_I/d')は0.48~5.31となる。なお、この実験における相対堤体幅(B/L)は0.019~0.470である。

4. 実験結果と考察

(1) 次元解析による線形抵抗係数の検討

透過率の実験値から、式(2)による線形抵抗係数の算出に先立ち、次元解析により線形抵抗係数の意義と、諸量との関係を吟味する。

一般に、直立で、非越波の透過性構造物を通過する波は、次の諸量が関係する。

$$\phi(H_T, H_I, L, h, B, d', \varepsilon, \rho, \nu, g) = 0 \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 H_T :透過波高、 H_I :入射波高、 L :入射波長、 h :水深、 B :堤体幅、 d' :空隙代表径、 ε :空隙率、 ρ :水の密度、 ν :水の動粘性係数、 g :重力加速度である。

式(4)を次元解析により整理すると、透過率 K_T は

$$K_T = \frac{H_T}{H_I} = \phi\left(\frac{h}{L}, \frac{H_I}{L}, \frac{B}{L}, \frac{H_I}{d'}, \varepsilon, R_e\right) \quad \dots\dots\dots(5)$$

となる。

ここに、 R_e :レイノルズ数である。

そこで、透過率の実験を行い、実験で求めた透過率と実験条件を式(2)に代入し、線形抵抗係数 f を求める。この場合、 f は K_T 、 h 、 σ 、 B および ε によって決まることから、式(5)はこれと同等な式(6)に書き換えられる。

$$\varphi\left(f, \frac{H_I}{L}, \frac{H_I}{d'}, R_e\right) = 0 \quad \dots\dots\dots(6)$$

この場合、レイノルズ数の定義が問題となるが、現象の本質を失わず、かつ簡潔に表現できる粒径レイノルズ数とし、次式で定義する。

$$R_e = u \cdot d' / \nu \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここに、 u :入射波の水平最大水粒子速度、 d' :ブロックの空隙代表径、 ν :水の動粘性係数である。

このように、 f は式(2)に含まれていない、 H_I/L 、 H_I/d' 、 R_e の3個の無次元量との関係を明らかにする必要がある。しかし、波の非線形性を表わす H_I/L は、本実験の場合、0.011~0.030と狭い範囲にあるため、これによって f の変化を見ることは困難である。結局、 H_I/d' および R_e による f の変化を調べることににより、 f の波浪変形解析への適用や、波変形に関する模型縮尺の限界に対する議論が可能となる。なお、これらの議論に際し、式(2)自体は線形化されているが、 f の算出のために用いられる K_T は実験上の非線形性を包含したものであることから、 f は非線形性を有することに注意する必要がある。

(2) 線形抵抗係数におよぼす波高・空隙代表径比の効果

式(6)に基き、線形抵抗係数と、波高・空隙代表径比の関係を波形勾配別に整理し、図-2に示す。

図-2 から, H_I/d' の増加とともに, f がおおむね一次関数的に大きくなるのが判る. このことは, 任意の空隙を持つ構造物を波が通過する状態を考えれば, 波の規模が大きいくほど, f が大きくなり, その結果, 透過率が小さくなるような現象であり, 容易に理解される.

また, $H_I/d' > 2$ において, f の値に差が認められるが, これは波形勾配による非線形性による原因の他, レイノルズ数の違いによるものと考えられる.

しかし, 全般的には f は H_I/d' と線形関係にあり, この増加とともに大きくなるものと見てよい.

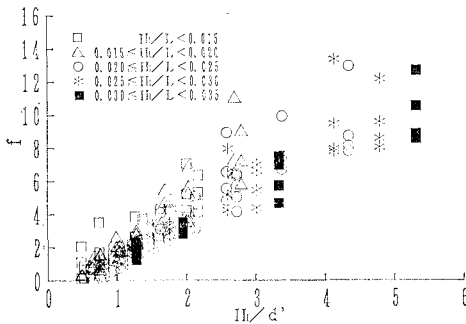


図-2 線形抵抗係数と波高・空隙代表径比との関係

(3) 線形抵抗係数におよぼす粒径レイノルズ数の効果

(1) で示したように, 線形抵抗係数の特性を合理的に表わすものとして, 粒径レイノルズ数との関係を明確にする必要がある. そこで, 線形抵抗係数と粒径レイノルズ数の関係を, H_I/d' 別に整理し, 図-3 に示す.

なお, Re の計算に際し, ν は $0.01 \text{ cm}^2/\text{sec}$ とした.

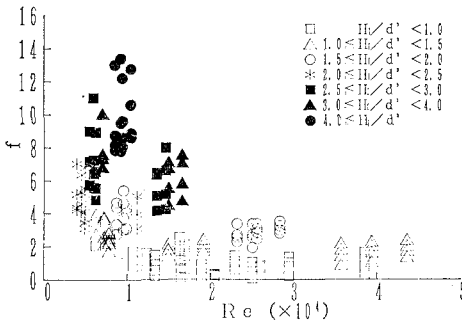


図-3 線形抵抗係数と粒径レイノルズ数との関係

図-3 より, H_I/d' の値にかかわらず, Re の増加とともに f の減少する様子が明らかに認められる. そして, Re が $(2 \sim 3) \times 10^4$ より大きな範囲では, f の変化は微弱となる. また, Re が同じ場合には, H_I/d' の大きいほど f の値は大きい. このように, f は Re の増加と共にほぼ指数関数的に減少し, 式 (8) に示す振動

流における層流境界層方程式を, 解析的に解いて得られる摩擦係数の挙動 (例えば, 樺木, 1991a) と類似の変化をするようである.

$$f_w = 5.01 Re_t^{-0.5} \quad (8)$$

ここに, Re_t : 境界層外縁流速, 振動流の周期および水の動粘性係数を用いたレイノルズ数である.

したがって, H_I/d' の値により異なるが, Re が $(2 \sim 3) \times 10^4$ より大きい領域では f は Re と独立で, ほぼ一定値となり, この Re の領域が線形抵抗係数に影響をおよぼす限界レイノルズ数的な領域と考えられる.

(4) 線形抵抗係数の推定式と透過率の算定

前述のように, 線形抵抗係数は

① 波高・空隙代表径比の増加とともに, 直線的に増大する.

② 粒径レイノルズ数の増加とともに, 指数関数的に減少する.

ここから, 式 (9) の関係を仮定し, 図-4 を製作した.

$$f = a(H_I/d')/Re^{0.5} \quad (9)$$

ここに, a : 定数である.

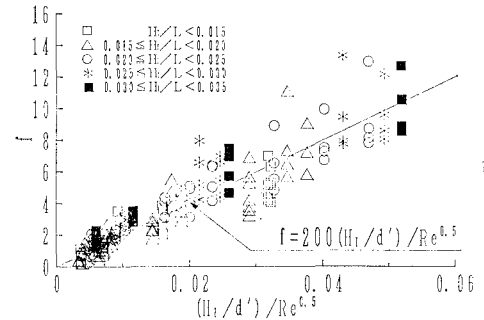


図-4 線形抵抗係数の回帰直線

図-4 より, 各点は $(H_I/d')/Re^{0.5} > 0.03$ の領域で, f にやや広がりを持つが, 線形抵抗係数の持つ性格から見て, 直線回帰による表現が可能と考える. そこで傾き a を求めたところ, $a = 199.9$ となり (相関係数 0.83), f の回帰式を式 (10) で表現することにする.

$$f = 200(H_I/d')/Re^{0.5} \quad (10)$$

次に, 式 (10) の妥当性を検証するため, これによって算出した f を, 式 (1) に代入して透過率 K_{TCAL} を求め, 実験値 K_T と比較する. この結果を 図-5 に示す.

図-5 より, K_T , K_{TCAL} はおおむね良い一致を示し, $\pm 20\%$ 以内に総数の 8 割強が存在する. このことより, 実験ならびに現地における線形抵抗係数の見積りや, 透過率, 反射率などの波浪変形の予測にあたり, 式 (10) は線形抵抗係数の推定にある程度, 使用できると

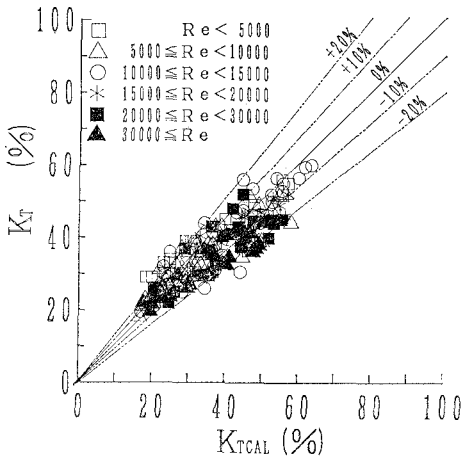


図-5 透過率の実験値と計算値の比較

思われる。

(5) 波変形に関する模型縮尺の限界

透過性構造物による波の変形を取り扱う場合、基礎方程式が充実し、計算方法も飛躍的に発展している今日でさえ、水理模型実験はなお有力な予測手段である。その際、通常、フルード則による各種物理量の縮尺が用いられる。しかし、多くの水理現象は粘性の影響を受け、レイノルズ数が深く関係するにも関わらず、モデルと現地のレイノルズ数が大きく異なることに對し、相似性に関する具体的な考慮がなされることは少ない。

ここでは、線形抵抗係数の相似性と、粒径レイノルズ数を考慮した波変形の実験の信頼度について検討する。

まず、線形抵抗係数の相似則について、式(10)に基づいて検討する。現地とモデルの線形抵抗係数をそれぞれ f_p , f_m とし、これらを次のように表わす。

$$\begin{aligned}
 f_p &= 200 \frac{(H_I)_p}{(d')_p} \frac{\sqrt{\nu}}{\sqrt{u_p} \sqrt{d'_p}} \\
 f_m &= 200 \frac{(H_I)_m}{(d')_m} \frac{\sqrt{\nu}}{\sqrt{u_m} \sqrt{d'_m}} \quad \dots\dots\dots (11)
 \end{aligned}$$

ここに、添字 p , m は諸量の現地 およびモデルの値である。

透過性構造物による波の変形を考えるにあたり、例えば透過率を取りあげると、現地と模型の間で、透過率が同じ値であるためには無次元量である線形抵抗係数は、

$$f_p = f_m \quad \dots\dots\dots (12)$$

でなければならない。この関係から、空隙代表径と入射波高の縮尺を求めると、式(13)が得られる。

$$\frac{(H_I)_p}{(d')_p} \frac{\sqrt{\nu}}{\sqrt{u_p} \sqrt{d'_p}} = \frac{(H_I)_m}{(d')_m} \frac{\sqrt{\nu}}{\sqrt{u_m} \sqrt{d'_m}}$$

より、

$$\frac{d'_m}{d'_p} = \left(\frac{H_{I_m}}{H_{I_p}} \right)^{1/3} \quad \dots\dots\dots (13)$$

この式(13)は両辺とも幾何学的な縮尺を表わしているにもかかわらず、異なった縮尺を示している。右辺()内の H_{I_m}/H_{I_p} は模型の縮尺(n)を表わし、このことから透過堤体の空隙代表径の縮尺は、 $n^{1/3}$ になる。これは式(10)に従った場合の結果である。

これまでの透過堤の実験は、異型ブロックの大きさも模形縮尺に従っており、式(13)によれば、これは現地とモデルの線形抵抗係数が異なる。このことからレイノルズの相似則を、完全に満足するような透過率の実験は不可能である。

しかし、図-3に見られるように、 Re の増加にともない、 f は指数関数的に減少し、ある Re の領域で f の変化は微弱となる。そして Re がこれ以上大きくなっても f には関与せず、波の変形に対して、大きな影響を与えない。この領域の限界値を $(Re)_c$ とする。

いま、透過性構造物による波変形の実験を行うにあたり、実験時の粒径レイノルズ数を $(Re)_m$ とすると、この値と $(Re)_c$ の大小関係により、次の2つのケースが考えられる。

1) ケース I : $(Re)_c < (Re)_m$ の場合

f_m は Re とほぼ独立した関係で、一定と考えてよく、波変形に関する実験結果の信頼性は高い。

2) ケース II : $(Re)_c > (Re)_m$ の場合

f_m は f_p に比べて、かなり大きくなることから、例えば透過率の実験では、その値が小さくなり、透過波高やこれにともなう波力を検討する場合、これらを過小評価することになる。

このように、粒径レイノルズ数と、模型実験の縮尺の間には、極めて重大な関係が存在する。しかし、図-3に示すように、特に波高・空隙代表径比ならびに粒径レイノルズ数の大きな領域のデータが少く、模型縮尺の選定に際し明確な指標となる限界の粒径レイノルズ数を示し得なかった。けれどもそのオーダーとしては、 $(Re)_c = (2 \sim 3) \times 10^4$ 程度と考えてよいようである。

すなわち、実験におけるレイノルズ数が $(Re)_c$ より十分、大きな実験の結果は現地へ適用できる。しかし、 $(Re)_c$ より小さなレイノルズ数での実験は、レイノルズ数の影響を無視できず、実験結果を現地へ適用することは難しいと考えられる。

以上のように、式(13)(あるいは図-4)に基く場合と、図-3に基く場合とでは、レイノルズ数あるいは模型の縮尺に対する結果が異なっている。現段階では高レイノルズ数での実験結果が少なく、これ以上の考察は難しい。しかし、波の変形について現地とモデルとの対応を考えると、レイノルズ数の影響を明らかにすることは今後の重要な課題となるであろう。

4. 結 言

直立ブロック積み堤を対象に、長波領域の規則波による透過率の実験を行ない、透過性構造物によるエネルギー逸散量を算定するための線形抵抗係数の特性や、その推定式、そして模型実験の限界に関する検討から、次の結論を得た。

(1) 線形抵抗係数は波高・空隙代表径比 (H_I/d') の増加とともに直線的に増大し、粒径レイノルズ数 (Re) の増加にともない、指数関数的に減少する。

(2) 線形抵抗係数の推定式として次式を得た。

$$f=200(H_I/d')/Re^{0.5}$$

(3) 波変形に関する模型実験は、粒径レイノルズ数にかかわらず、線形抵抗係数が一定となるような条件で行なう必要があり、このような粒径レイノルズ数は、おおむね $(2\sim3)\times 10^4$ 以上の領域であろう。

(4) 現地とモデルで線形抵抗係数(無次元量)が等しくなるためには、ブロック積み堤などで使用されるブロックの縮尺を、模型縮尺の 1/3 乗にする必要があり、従来、行なわれてきた模型実験の結果を直接、現地に適用することは問題がある。

参 考 文 献

- 泉宮尊司・遠藤雅人 (1989): 潜堤および透過性構造物のある海浜における波動場解析, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 638-642.
- 泉宮尊司・古俣弘和・水上 淳 (1990): 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, 第 37 巻, pp. 544-548.
- 近藤淑郎 (1981): 直立消波構造物の水理特性, 水工学に関する夏期研修会講義集, 81-B-1, 16 p.
- 榎木 亨・井田康夫・福田 護 (1990): 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, 第 6 巻, pp. 287-291.
- 榎木 亨 (1991a): 波と漂砂と構造物, 技報堂出版, 482 p.
- 榎木 亨・井田康夫・後野正雄・菅 智浩 (1991b): 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, 第 7 巻, pp. 155-159.
- Somchai, R.・磯部雅彦・渡辺 晃 (1989): 透過潜堤による波浪変形の解析モデル, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 643-647.
- Delmonte, R. C. (1972): Scale effects of wave transmission through permeable structures, Proc. 13th. ICCE, pp. 1867-1872.
- Sollitt, C. K. and R. H. Cross, III (1972): Wave reflection and transmission at permeable breakwaters, Ralph M. Parsons Laboratory, MIT, Report No. 147, 250 p.