

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

An Experimental Study on Dimensionless Linearized Friction Coefficient
of Breakwaters with Precast Concrete Armour Unit

榎木 亨^{*}・井田 康夫^{**}・後野 正雄^{***}・菅 智浩^{***}

Toru.Sawaragi,Yasuo.Ida,Masao.Nochino and Tomohiro.Suga

Linearized friction coefficient was examined experimentally for permeable breakwaters with precast concrete armour unit in shallow water region. The equation proposed by Sollitt et.al. was applied for calculating the friction coefficient from transmission coefficient. The friction coefficients obtained were less than 14 and varied with following parameters: ratio of incident wave height to block scale, H_1/d , ratio of breakwater's width to wave length, B/L and wave steepness, H_1/L . The parameter H_1/d strongly affected the friction coefficient. The friction coefficient varied in the small range of 0 to 4 when the Reynolds number, ud/ν , was greater than 3×10^4 .

Keywords: Linearized friction coefficient, Permeable breakwater
Transmission coefficient, Reynolds number

1. はじめに

透過性構造物は波浪制御、侵食防止等を目的として国内で広く用いられており、近年では沿岸域の積極的利用策の一環として消波堤などの形式で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の形成に寄与している。また潜堤形式で景観に配慮した広幅潜堤の計画も各地で活発に行われている。

このような背景のもと透過性構造物による波浪変形の予測もその重要性を増し、構造物の設置目的、入射波ならびに構造物の特性を考慮した肌理細かい波浪制御が要求される。

このため主として潜堤を対象に泉宮ら(1989)¹⁾、Somchaiら(1989)²⁾が緩勾配方程式による波浪変形解析を発表している。これらは透過層内外の波動場を統一的に表示し精度の高い結果を示している。Somchaiらの方法は厳密ではあるが計算に時間がかかる。泉宮らの方法は簡便ではあるが、潜堤の波浪制御特性を決定する線形抵抗係数を実験により定めなければならないという問題点がある。この点を解決するため続いて泉宮ら(1990)³⁾は線形抵抗係数の実験式を提案している。しかし実験ケースの少ないことなど検討の余地が多い。

このように線形抵抗係数は潜堤だけでは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ものでありながらその具体的内容はほとんど知られていない。

そこで本論では線形抵抗係数の実態を把握するための第一段階として長波領域におけるブロック積み消波堤の線形抵抗係数を実験により求め、線形抵抗係数とこれに関係する諸量、すなわち慣性係数、入射波ならびに構造物の特性、Reynolds数などとの関係を解明し、

今後の波浪変形解析における線形抵抗係数の取扱いについて一定の方向付けを試みるものである。

2. 長波理論に基づく線形抵抗係数

透過性構造物周辺の波浪場を基本的に取り扱う場合、モデルは図-1のように水平床上の直立構造物とし、非越波状態を考える。

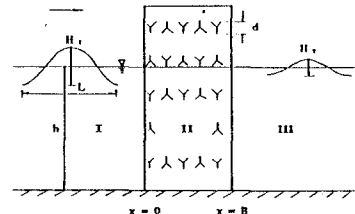


図-1 ブロック積み消波堤と記号の定義

透過性構造物による波浪の変形の程度は反射率、透過率で表されることが多く、これらの簡便な算出は現場技術者からの要求も高い。反射率、透過率を求める方法は一般に図-1のように領域を分割し、それぞれの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)⁴⁾はLorentzの等価仕事則を用いて次式を表わした。

$$\sum_{n=1}^{\infty} C_{rn} \frac{K_m^2 - k_1^2}{K_m^2 - k_n^2} \left(\frac{k_n}{k_1} + \frac{\varepsilon}{s - i f} \frac{K_m}{k_1} \right) + e^{-i K_m B} \sum_{n=1}^{\infty} C_{tn} \frac{K_m^2 - k_1^2}{K_m^2 - k_n^2} \left(\frac{k_n}{k_1} - \frac{\varepsilon}{s - i f} \frac{K_m}{k_1} \right) = 1.0 - \frac{\varepsilon}{s - i f} \frac{K_m}{k_1} \quad (1)$$

* 正会員 大阪大学工学部土木工学科 (565 吹田市山田上)
** 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)
*** 学生会員 大阪工業大学大学院工学研究科

$$\sum_{n=1}^{\infty} C_{rn} \frac{K_m^2 - k_1^2}{K_m^2 - k_n^2} \left(\frac{k_n}{k_1} - \frac{\varepsilon}{s - i f} \frac{K_m}{k_1} \right) + \frac{-i K_m B}{e} \sum_{n=1}^{\infty} C_{tn} \frac{K_m^2 - k_1^2}{K_m^2 - k_n^2} \left(\frac{k_n}{k_1} + \frac{\varepsilon}{s - i f} \frac{K_m}{k_1} \right) = 1.0 + \frac{\varepsilon}{s - i f} \frac{K_m}{k_1} \quad (2)$$

ここで C_{rn} : n 次モードの複素反射振幅

C_{tn} : n 次モードの複素透過振幅

K_m : m 次モードの構造物内の複素波数

k_n : n 次モードの波数

k_1 : 進行波モードの波数

B : 堤体幅 f : 線形抵抗係数

s : 慣性係数 ε : 空隙率 i : $\sqrt{-1}$

そして式(1)、(2)に諸量を与えて5次モードまで反射率、透過率を計算する一方、長波の条件を与えて計算を簡略にし両者の結果を比較している。長波領域における反射率(K_R)、透過率(K_T)を式(3)、式(4)に示す。

$$K_R = \left\{ \frac{(s - \varepsilon^2)^2 + f^2}{(s + \varepsilon^2)^2 + (f + \frac{2\varepsilon\sqrt{gh}}{\sigma B})^2} \right\}^{1/2} \quad (3)$$

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

ここで σ : 角周波数 g : 重力加速度 h : 水深

そこで筆者らは式(4)から線形抵抗係数を導くこととし、長波領域における線形抵抗係数の算定式として式(5)を得た。

$$f = \frac{\varepsilon\sqrt{gh}}{\sigma B} \left\{ -2 \pm 2 \sqrt{\frac{1 - \sigma^2 B^2 (s^2 + 2s\varepsilon^2 + \varepsilon^4)}{K_T^2 4\varepsilon^2 gh}} \right\} \quad (5)$$

3. 実験

(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)を設けて行った。天端高は越波させないようにすべて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。

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回づつ行ない、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に示すように比水深0.084(平均)の合計12個の波である。この比水深は一般に言われる長波の限界値1/25~1/20よりやや大きい造波装置の制約もあり、長波近似として以後扱う。

堤体は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 $B=10\sim 200$ 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。

表-1 入射波の諸元

比水深 h/L	0.084 (0.081~0.086)
水深 h (cm)	30~45
波高 H_1 (cm)	5.8~15.4
周期 T (sec)	2.0~2.6
波長 L (cm)	356~522
波形勾配 H_1/L	0.011~0.030
波の個数	12

表-2 構造物の諸元

テトラポッドの高さ d (cm)	堤体幅 B (cm)	H_1/d	B/L
4.5	10, 20, 30, 40	1.29~3.42	0.019~0.112
7.2	20, 40, 60	0.81~2.14	0.038~0.169
12.2	30, 40, 60, 100	0.48~1.26	0.057~0.280
18.9	60, 80, 120, 200	0.31~0.81	0.115~0.470

4. 実験結果と考察

(1) 透過率

線形抵抗係数を求める前に実験値の妥当性を検討するため、透過率と波高ブロック径比 H_1/d (図-2)、相対堤体幅 B/L (図-3)、波形勾配 H_1/L (図-4)の関係をそれぞれ調べた。

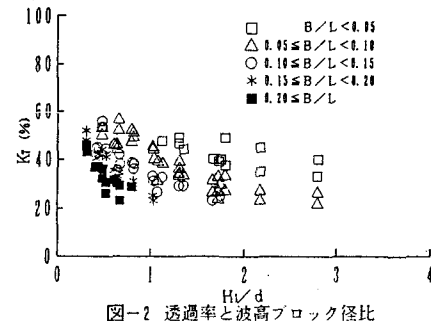


図-2 透過率と波高ブロック径比

図-2は $H_1/L=0.020$ (0.016~0.024)のとき K_T と H_1/d の関係を B/L 別にみたもので、 $B/L<0.05$ の場合にやや K_T に変動はみられるもののこれ以外は H_1/d の増加に伴っても K_T はほぼ指数関数的に減少しており、その値は B/L が大きくなるほど小さい。

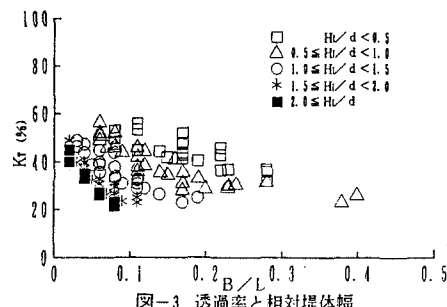


図-3 透過率と相対堤体幅

図-3は図-2と同じ実験値を横軸に B/L をとり、 H_1/d 別に整理したもので $H_1/d<0.5$ の実験値に多少幅があるものの他は B/L の増加とともに K_T はほぼ指数関数的な減少が認められ、 B/L の値が同じ場合は H_1/d が大きいほど K_T は小さい。

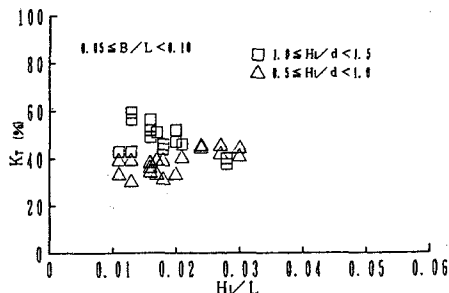


図-4 透過率と波形勾配

図-4は B/L がほぼ等しい場合に K_T と H_1/L の関係を H_1/d 別にみたもので、 H_1/L による K_T の変化は H_1/d の値により大きく異なり、単純に H_1/L の増減と関係付けられない。

以上のことは既報(1990)⁵⁾のとおり、透過性構造物における透過率を議論する場合入射波の特性と構造物の特性が相互に関係し、波高とブロック径の比、言い換えれば空隙の大きさとの比などが重要な因子となることを示している。

(2) 線形抵抗係数: f

線形抵抗係数は式(5)に実験条件及び透過率の実測値を代入して算出した。この計算において空隙率は構造物がテトラポッドの乱積み堤であるため $\varepsilon = 0.5$ とした。また慣性係数は近藤(1981)⁶⁾によると石やブロック積みのように空隙の大きさが個体の大きさと同程度の場合には式(6)で示す範囲にある。

$$1 \leq s \leq 1 + \varepsilon \quad (6)$$

したがって $s = 1 \sim 1.5$ となることから、中間値の $s = 1.2$ を使用して線形抵抗係数を求めるが s の値が線形抵抗係数に及ぼす影響については後述する。

このようにして得られた合計180個の線形抵抗係数は $0.07 < f < 13.38$ の範囲にあり、非常に幅広く分布している。 f は次に述べるように透過率 K_T ならびに波の変形に極めて密接な関係があり、このことから f の選定については細心の注意を必要としよう。

次に前出の K_T との関係をみた諸因子、 H_1/d 、 B/L 、 H_1/L と f の関係を調べたものの例を図-5~7に示す。

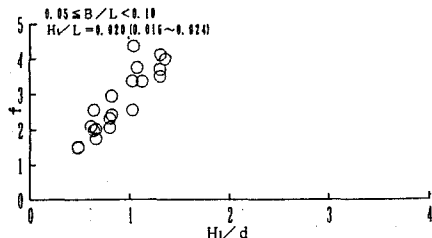


図-5 線形抵抗係数と波高ブロック径比

図-5は f と H_1/d の関係をみたもので、これらの実験条件は $0.05 \leq B/L < 0.10$ 、 $H_1/L = 0.020$ ($0.016 \sim 0.024$)の範囲にある。図より H_1/d の増加と共に f が一次関数的に大きくなるのが判る。これは波の大きさと空隙の大きさの比が構造物内の抵抗を表現する場合、重要な因子であることを示す。

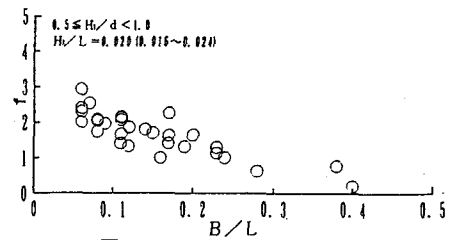


図-6 線形抵抗係数と相対堤体幅

図-6は実験条件が $0.5 \leq H_1/d < 1.0$ 、 $H_1/L = 0.020$ ($0.016 \sim 0.024$)の範囲にある実験値を横軸に B/L をとり f の変化を調べたもので、同図よりプロットに幅はあるが全体としてみれば B/L の増加に伴い f が減少している。

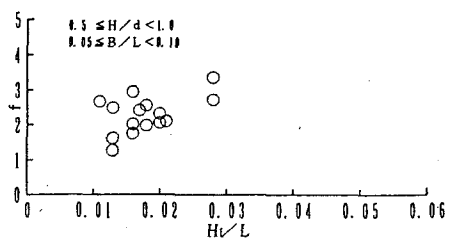


図-7 線形抵抗係数と波形勾配

図-7は f と H_1/L の関係をみたもので、実験条件の範囲は $0.5 \leq H_1/d < 1.0$ 、 $0.05 \leq B/L < 0.10$ である。この図から f と H_1/L の関係は明確ではない。

以上のことより線形抵抗係数と波高ブロック径比の間には明瞭な線形関係が認められる。また図-7に示す相対堤体幅の増加に伴い線形抵抗係数が減少する理由について考察する。

これは式(5)を変形したとき

$$f = \frac{\varepsilon}{kB} \left\{ -2 \pm 2 \sqrt{\frac{1}{K_T^2} - \frac{k^2 B^2}{4 \varepsilon^2} (s^2 + 2s\varepsilon^2 + \varepsilon^4)} \right\} \quad (7)$$

となり f が kB (k :波数)、すなわち B/L の逆数に比例する形になっている。 $B = \text{const}$ で L の変化を考えると、 f が変化するのは周期性が影響している。以上のことより、 f が B/L の逆数に比例するのは当然のことといえる。

すなわち式(5)は B/L が f に及ぼす影響は十分に表していると考えられるが、逆に図-5に示されるような H_1/d による f の変化が式(5)には含まれておらず、今後の式(5)に代わるべき式の導出が必要となろう。

また波形勾配との関係は特に認められなかった。

(3) 慣性係数と線形抵抗係数の関係

(2)の線形抵抗係数の算出に際し、 $s = 1.2$ として計算を試みたが空隙と個体の大きさがほぼ等しいブロック積み堤のような構造物における慣性係数の値はまだ正確には判っておらず、吟味する必要がある。

そこで $s = 1.2$ の他に $1 \sim 1.5$ の範囲にある $1.1, 1.3, 1.5$ の3通りについて f_s を算出し、 $s = 1.2$ の場合の $f_{1.2}$ との差、 $(f_s - f_{1.2})$ をそれぞれ求めた。そしてこの差と H_1/d の関係を図-8に示す。

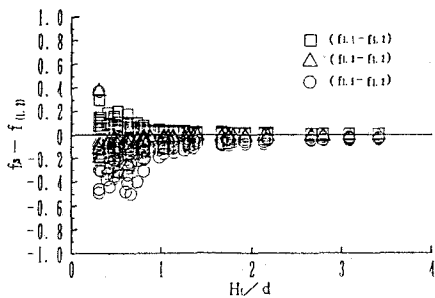


図-8 慣性係数が線形抵抗係数に与える影響

図から $(f_{1.5} - f_{1.2})$ の値が $H/d < 1$ の範囲でやや大きいようであるが、全体的に見れば $(f_{1.5} - f_{1.2})$ の値は ± 0.2 以内に大多数がある。これは f の値が $1 \sim 10$ のオーダーであることを考慮すれば許容される程度の差であり、今後この種の計算に際し、 $f = 1.1 \sim 1.3$ の値をとれば充分であろう。

(4) Reynolds数と線形抵抗係数の関係

透過性構造物における線形抵抗係数の特性を表現する合理的な方法は種々考えられるが、その一つに Reynolds数との関係を明確にする必要がある。この場合 Reynolds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という観点から、代表流速を入射波の水面における水平水粒子速度、代表長さを空隙のスケールを表すブロック径とし、次のように Reynolds数を定義する。

$$Re = \frac{u_{max} \cdot d}{\nu} \quad (8)$$

ここで u_{max} : 入射波の水平最大水粒子速度

d : ブロック径

ν : 水の動粘性係数 ($0.01 \text{ cm}^2/\text{sec}$)

このようにして得られた Reynolds数と線形抵抗係数の関係を図-9～11に示す。

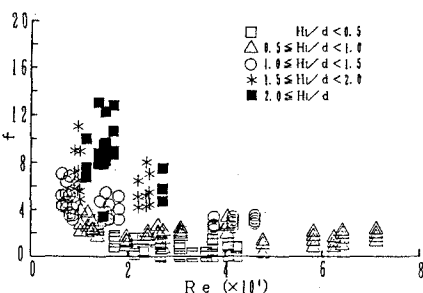


図-9 線形抵抗係数と Reynolds数

図-9は f と Re の関係を H/d 別に表わしたもので、 Re の増加と共に f の減少する様子が明らかに認められる。そしてその減少の割合は $Re < 30000$ の範囲が大きく、 Re 数が大きい領域では f はあまり減少しない。また Re 数が同じ場合には H/d の大きいほど f の値は小さい。

図-10は B/L 別に f と Re の関係をみたものであるが全体としては Re の増加と共に f は減少しているが B/L の違いによる差は判然としない。

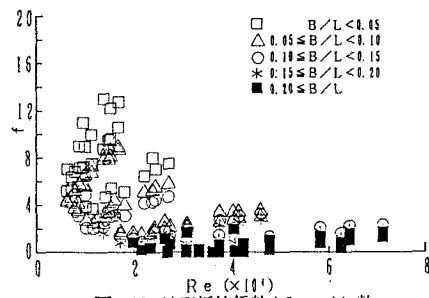


図-10 線形抵抗係数と Reynolds数

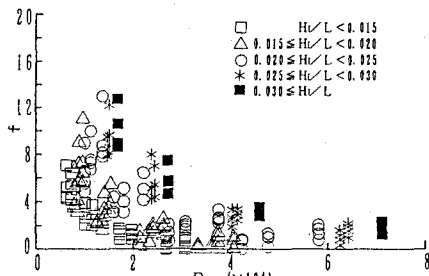


図-11 線形抵抗係数と Reynolds数

図-11は f と Re の関係を H/L 別に表したもので Re の増加に伴い f が減少し、 Re 数が同じ場合はバラツキはあるが H/L の小さいほど f が小さいことが判る。このように入射波の水平最大水粒子速度とブロック径を用いて表わした Reynolds数と線形抵抗係数の間には有意な関係があり、Reynolds数の増加と共に線形抵抗係数がほぼ指数関数的に減少し、層流境界層理論における摩擦係数と類似の変化をするようである。

また Reynolds数が同じ場合には波高ブロック径比の小さいほど、あるいは波形勾配の小さいほど線形抵抗係数が小さくなることが認められ、この値が Reynolds数のみならず波形勾配、波高ブロック径比によって変化することが明らかになった。

5. 結論

直立ブロック堤を対象に規則波による透過率実験を行ない、長波近似領域における線形抵抗係数について次の結果を得た。

(1) 本実験の範囲において線形抵抗係数は $1 \sim 10$ のオーダーである。

(2) 慣性係数を $1.1 \sim 1.5$ の範囲で変化させても線形抵抗係数にはあまり大きな差は認められず、線形抵抗係数と慣性係数の相関性は弱い。したがって式(5)に基づく波浪変形解析において慣性係数は $1.1 \sim 1.3$ 程度を用いれば実用上問題はないと考える。

(3) 線形抵抗係数は Reynolds数の増加と共に指数関数的に減少し、層流境界層理論における摩擦係数と同様な傾向が認められた。また Reynolds数が同じ場合には波形勾配ならびに波高ブロック径比の小さいほど線形抵抗係数が小さくなり、線形抵抗係数が Reynolds数だけでなく波形勾配、波高ブロック径比によって変化する

ることが明らかになった。

以上の結論を得たが今後は長波領域のみでなく、浅水表面波全般を対象にした線形抵抗係数の評価に努めたい。

参考文献

- 1) 泉宮尊司・遠藤雅人: 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.
 - 2) Somchai・磯部雅彦・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, 第36巻, pp. 643~647.
 - 3) 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, 第37巻, pp. 544~548.
 - 4) Sollitt, C. K. and R. H. Cross, III: Wave refraction and transmission at permeable breakwaters, Tech. Rep. No. 147, R.H. Parsons Lab., MIT, 1972.
 - 5) 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, vol. 6 pp. 287~291.
 - 6) 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, 16p
-