

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

Reliability and Scale Effect on Model Experiment of Wave Transformation by Permeable Breakwaters

井田 康夫*・須貝 輝博**・小林 悟***
Yasuo Ida, Akihiro Sugai and Satoru Kobayashi

Scale effect was clearly that model experiment of wave transformation was examined for permeable breakwaters with precast concrete armour unit in shallow water region .

Results of model experiment were not rely on that Reynolds number , Re was less than 4×10^4 .

These were investigated with following parameter : ratio of incident wave height to block scale , H/d' , ratio of dimensionless linealized friction coefficient , f .

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

1. 緒言

「沿岸域」は1977年に第3次全国総合開発計画の中で初めてその概念が使われ、近年では環境面にも配慮した「地球との共生」をスタンスとした事業が活発に展開されている。この間、水産関連施設(栽培漁業への支援)、海洋性リクレーション施設(余暇の充実)、そして都市活性化のための基盤施設の整備の一環として多数の透過性構造物が建設されている。

これらの構造物には空隙の効用により、きめ細かい波浪制御のほか、優先度は異なるものの海水交換性、漂砂制御性などが期待される。このため、計画段階で少なくとも構造物による波の変形程度を予測する必要がある。この予測方法には理論に基づく計算と水理模型実験があるが、前者は複雑な繰り返し計算¹⁾を必要としたり、計算上、重要となる抵抗係数の算定²⁾に問題を残している。一方、後者は実験において空隙が小さくなった場合の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が不明であり、実験結果の信頼度に問題が残る。いずれの解決のためにも透過層内部の流体運動を把握することが必至であろう。

そこで著者らは、波動と非定常性において同等な振動流中の透過層の流体運動を可視化し、水粒子速度の大略を把握すると共に、既報^{5),6)}の直立ブロック堤における線形抵抗係数の検討結果を併せ考え、粒径レイノルズ数を媒介とした波浪変形実験の信頼性と縮尺限界について論究しようとするものである。

2. 透過層の空隙における水粒子速度

2.1 可視化と粒子追跡の手法

振動流中の流体運動の可視化とその追跡手法は既報⁷⁾に詳述されているため、ここではその概略を述べる。

(1) 実験装置と方法

実験は、図-1に示す高さ15cm、幅20cm、長さ150cmのU字型振動流水槽(透明アクリル樹脂製)の中央部に、長さ60cmの透過層を設置して行った。この透過層は透明ブロック模型(高さ7.2cm、屈折率1.498)を乱積み充填し、両端を金網で被覆している。

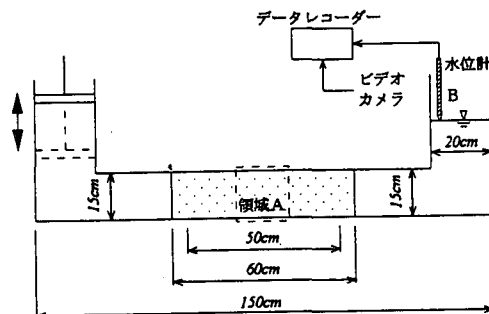


図-1 実験装置の概要

振動流は、表-1に示す6種類で、水槽の鉛直部にあるピストンで無断変速機付きモーターにより発生させた。なお、表中の振動流タイプについては、ピストン移動量の大小を B, S 、周期の長短を L, M, S とし、この組み合わせにより表示している。

表-1 振動流の種類

振動流タイプ	BS	BM	BL	SS	SM	SL
ピストン移動量 a (cm)	10.3	10.3	10.3	5.4	5.4	5.4
周期 T (sec)	2.00	2.55	3.32	2.00	2.55	3.32

流体は、前述の透明ブロックと屈折率が等しくなるように、濃度を重量百分率64%に調製したヨウ化ナトリ

* 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 修成建設専門学校土木工学科
*** 学生会員 大阪工業大学大学院工学研究科

ウム水溶液を用いた。

計測は、トレーサー粒子(ポリ塩化ビニル)を投入し、粒子の挙動がほぼ安定した後、超高速ビデオカメラを用い750ppsで6sec間の流況を記録した。その後、30ppsでビデオテープに再録した。計測断面は、透過層中央部の15×15cmの鉛直面とし、レーザーによるシート光を、上方から5mm厚で照射している。なお、この鉛直面は水槽側面より2cm奥側とした。

また、水槽の鉛直部水面付近(B点)にサーボ式水位計を設置し、この記録から断面平均流速(U)を求めた。

(2) 粒子追跡の手法

可視化された静止画像中の粒子をPTVにより追跡計算を行う。具体的には画像をデジタル化した後、2値化処理を行い、近畿大学理工学部 江藤教授の開発された粒子自動追跡アルゴリズムを使用させていただいた。これは、カルマンフィルターを用いて次の時刻の粒子位置を推定し、出現した粒子が同一の粒子かどうかの対応付けを χ^2 検定により行う方法である。

以上の結果を各粒子の時刻ごとの流速ベクトルで出力し、測定断面内の格子点または指定されたエリアの水平、鉛直の流速成分を求め、これの時系列表示を行なった。

なお、解析対象とした静止画像は1～15コマ目まで連続してサンプリングした後、45コマを空け、再び61～75コマ目までをサンプリングする方法で、合計495画面で解析を進めた。

2.2 解析結果

(1) 解析手法の検証

透過層内の流速測定に先立ち、この計測法の適否を検討するため、透過層を設置しない場合の水平(x)方向の流速成分(U)を、透過層予定位置の中央付近の広範な領域(半径 $r=15\text{cm}$)において計測した。この結果を図-2に示す。図中の○印は $1/750(\text{sec}) \times 15(\text{コマ})$ の平均値で、その上下の実線は15コマ中の最大値、最小値を示す変動幅である。

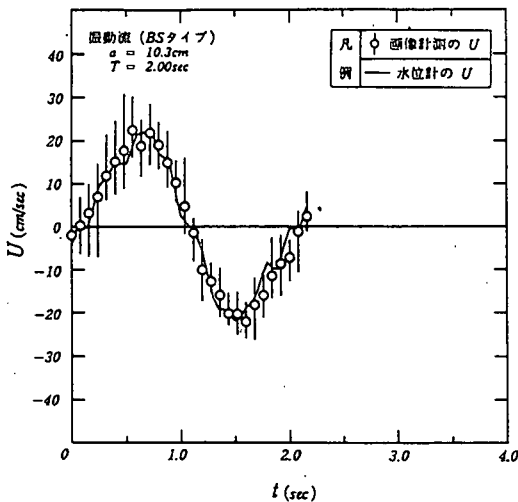


図-2 水平流速成分の比較(BS タイプ)

また、図中の実線は、水槽水面の変動をとらえた水位計の記録(水位-時間曲線)から求めた断面平均流速の変化を表したものである。同図より、 U はほぼ妥当な正弦波形を示しており、両者の代表流速振幅比は、表-2に示すように0.89～1.01の範囲にあり、良く一致している。

この結果、前述の画像解析法により提供される流速測定結果はほぼ信頼できるものと考えられる。

表-2 代表流速振幅の比較

タイプ	方 法		①/②
	①画像計測	②水位計	
BS	22.3cm/sec	22.7cm/sec	0.98
BM	16.9cm/sec	16.8cm/sec	1.01
SS	11.6cm/sec	13.0cm/sec	0.89

(2) 透過層内部の流況

透過層内部の流体運動を明らかにするため、6種類の振動流を対象に、図-1に示す透過層中心部の領域A(15×15cm)において、画像中の全粒子を解析して1周期分の平均の水平、鉛直流速成分(u, v)の変動を調べた。

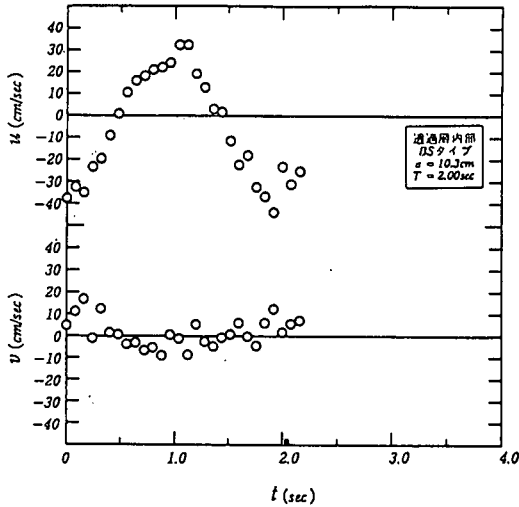


図-3 透過層内部の流速成分の変動(BS タイプ)

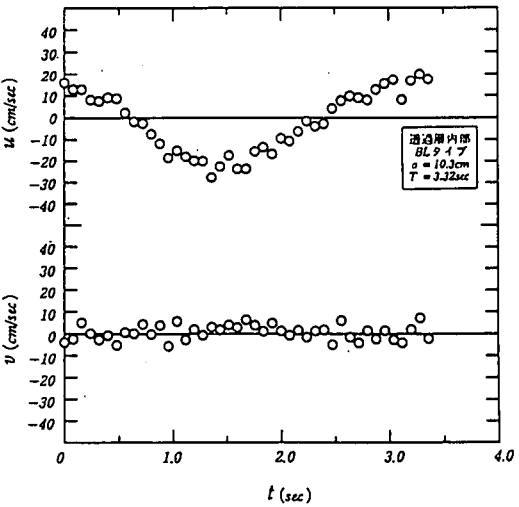


図-4 透過層内部の流速成分の変動(BL タイプ)

図-3および図-4は、画像中の対応付けのできた粒子を対象にし、15コマ間の u, v を解析してその平均値を求めて示したものである。図中の u は右向きを正、左向きを負で、 v は上向きを負、下向きを正で表わしている。

これらの図から、 u, v はおおむね正負の値を規則的に反復しており、ピストン移動量が大きいほど、また周期が短いほど、 u, v の変動量は大きくなり、BSタイプはSLタイプの約3倍にも達している。

(3) 代表流速振幅と粒径レイノルズ数の相関

構造物の空隙内流速を水平流速 u の代表流速振幅(u_0)とし、水位計から求めた代表流速振幅(U)との比、 u_0/U で空隙内の流速の変動の程度を表わすことにする。(この場合、 U は画像計測により求めた透過層の無い場合の代表流速振幅(u_0^*)とほぼ一致していることは前述している。)この代表流速振幅の比、 u_0/U をここでは流速倍率(M)と呼ぶことにする。

次に、この M は、後述の空隙代表径を用いたこの流れ場の粒径レイノルズ数($Re = U \cdot d' / \nu$)と大きく関係することが考えられるため、両者の相関を見ることにし、この結果を表-3および図-5に示す。なお、 Re の計算に際し、空隙代表径(d')は、テトラポッド乱積み構造では空隙率が50%となるため、ブロック1個と同体積の球の直径で表わし、 $d' = 4.6\text{cm}$ となる。また、流体の動粘性係数(ν)はヨウ化ナトリウム水溶液(重量百分率64%)を用いた実験であるため $\nu = 0.016\text{cm}^2/\text{sec}$ とした。

表-3 透過層内の流速

振動流タイプ	BS	BM	BL	SS	SM	SL
ピストン移動量 a (cm)	10.3	10.3	10.3	5.4	5.4	5.4
周期 T (sec)	2.00	2.55	3.32	2.00	2.55	3.32
水位計から求めた 平均流速振幅 U (cm/sec)	22.71	16.82	14.30	12.95	9.93	8.08
画像計測から求めた 平均流速振幅 (透過層無し) u_0^* (cm/sec)	22.31	16.86	—	11.64	—	—
画像計測から求めた 平均流速振幅 (透過層有り) u_0 (cm/sec)	38.21	30.08	23.73	15.63	14.67	10.01
流速倍率 $M = \frac{u_0}{U}$	1.68	1.79	1.66	1.20	1.48	1.24
粒径レイノルズ数 $Re = \frac{U \cdot d'}{\nu}$	6528	4834	4110	3723	2853	2322

d' : テトラポッドの空隙代表径 (4.6cm)
 ν : 液体(ヨウ化ナトリウム水溶液)の動粘性係数 (0.016cm²/sec)

図-5中のプロットの分布から、次の仮定のもとに、最小自乗法により M と Re の関係式を求めた。

(仮定)

- 1) M と Re は、 $M \propto a \cdot \text{EXP}(b \cdot Re)$ (a, b :定数)で表す指数関係にある。
- 2) 空隙率が50%であるため、平均的に考えれば断面積

が1/2になることから、 M は2.0に漸近する。
この結果、 $a = 1.18$ 、 $b = -0.00024$ となり、流速倍率式として次式が得られた。

$$M = 2.0 - 1.18 \cdot \text{EXP}(-0.00024 \cdot Re) \tag{1}$$

ここに、 Re :粒径レイノルズ数($= U \cdot d' / \nu$)、 U :構造物が無い場合の代表流速振幅、 d' :空隙代表径、 ν :流体の動粘性係数である。

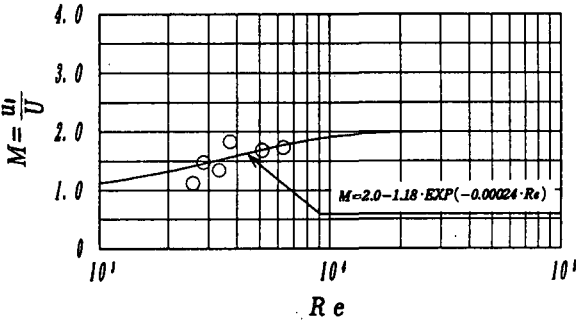


図-5 流速倍率と粒径レイノルズ数の関係

以上のことから、空隙率50%の構造物中の流れにおいては M の値は $\text{EXP}(-Re)$ によって変化し、式(1)により、ある程度、計算可能となった。したがって、その挙動が不明であった複雑な空隙中の流体運動において、空隙中の流速は断面平均的な代表流速の考え方を補正することにより算定できることになり、この結果を振動流だけでなく波浪場にも拡張できるものとして今後の検討に用いる。

3. 直立堤における線形抵抗

3.1 線形抵抗係数の算出

本節では、波が透過性構造物を通過する際に生ずる2種類の抵抗、即ち波の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を合算して線形的な総抵抗とみなし、これを線形抵抗係数(f)で表すこととする。

長波領域において透過率(K_T)は式(2)のように表現できることから、図-6に示す直立ブロック積み堤の透過率実験値とその実験条件を代入すれば線形抵抗係数(f)は算出可能となる。

$$K_T = \frac{1}{\left[\left(1 + \frac{\sigma B f}{2e \sqrt{gh}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma B (s + e^2)}{2e \sqrt{gh}} \right)^2 \right]^{1/2}} \tag{2}$$

ここに、 σ :角振動数、 B :堤体幅、 e :空隙率、 h :水深、 g :重力加速度、 s :慣性係数である。

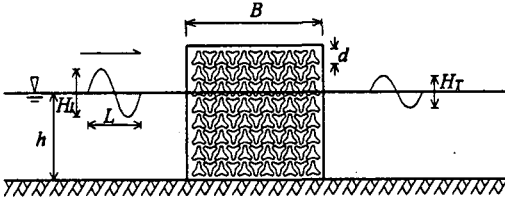


図-6 直立ブロック堤

実験は、相対水深 $0.081 \sim 0.086$ 、波形勾配 $0.011 \sim 0.030$ の長波近似領域の 12 個の波と、ブロックの大きさ ($d=4.5 \sim 18.9\text{cm}$ [空隙代表径 $d'=2.9 \sim 12.1\text{cm}$]) と、堤体幅 ($B=10 \sim 200\text{cm}$) を変化させた構造物の組み合わせにより合計 180 ケースである。線形抵抗係数の算出に際し、空隙率 (ϵ) は構造物がテトラポッド模型の乱積み堤であることから、 $\epsilon=0.5$ とし、慣性係数 (s) は 1.2 を用いた。

3.2 線形抵抗係数の特性

(1) 波高・空隙代表径比の影響

式(2)より得られた線形抵抗係数 (f) と、波高・空隙代表径比 (H/d') の関係を波形勾配別に整理し、図-7 に示す。同図から、 H/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わかる。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想定すれば、波の規模が大きいほど f は大きくなり、その結果、透過率が小さくなるような現象であることが容易に理解できる。

また $H/d' > 2$ において、 H/L による f の変動幅が大きい。この理由の 1 つは波形勾配による非線形性に依るものと思われる。これは f の算出に用いた Kt は実験上の非線形性を包含したものであり、この結果、 f に非線形性が表われたと理解できる。もう一つの理由は粘性の効果、すなわちレイノルズ数の違いによるものと考えられる。しかしながら全般的に、 f は H/d' と線形関係にあり、この比の増加とともに大きくなるものと見られる。

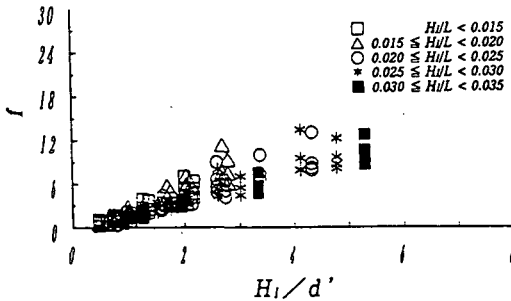


図-7 線形抵抗係数と波高・空隙代表径比

(2) 粒径レイノルズ数の影響

一般に狭い空隙内で流体運動が行われる時、レイノルズ数が大きく関係することはよく知られているが、波の変形に関しては一般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かった。しかしながら、ブロック構造の空隙において、波の規模や水粒子速度と、空隙の形や大きさの係り合いによっては粘性効果を考慮する必要があり、レイノルズ数が波変形におよぼす影響について検討することにする。

この場合、レイノルズ数の定義が問題となるが、透過現象の本質を失わず、かつ簡潔に表現できるという視点

から粒径レイノルズ数 (Re) を用いることとし、前節で得られた結果を活用し、次式のように定義する。

$$Re = u_0 \cdot d' / \nu \quad (3a)$$

$$u_0 = MU \quad (3b)$$

$$M = 2.0 - 1.18 \cdot \exp(-0.00024 \cdot Re^*) \quad (3c)$$

$$Re^* = U \cdot d' / \nu \quad (3d)$$

ここに、 Re :空隙内の水平水粒子速度による補正後の粒径レイノルズ数、 Re^* :長波の水平水粒子速度による補正前の粒径レイノルズ数、 M :流速倍率、 u_0 :空隙内の水平水粒子速度、 U :長波の水平水粒子速度、 d' :ブロックの空隙代表径、 ν :動粘性係数 ($0.01\text{cm}^2/\text{sec}$) である。

このようにして得られた粒径レイノルズ数 (Re) と線形抵抗係数 (f) の関係を H/d' 別に整理し、図-8 に示す。同図より、 H/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 $(4 \sim 6) \times 10^4$ 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/d' の大きいほど f の値は大きい。このように、 f は Re の増加とともにほぼ指数関数的に減少し、空隙を有する構造物による波変形を扱う場合にはレイノルズ数が重要な役割を担うことは明らかである。

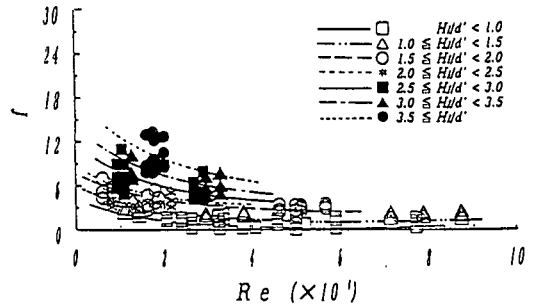


図-8 線形抵抗係数と粒径レイノルズ数

3.3 線形抵抗係数の推定式

前述のように、ブロック積み堤における線形抵抗係数は次の特徴を持つことが確認された。

- 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。

このうち、②の特徴は図-8の傾向から、線形抵抗係数は粒径レイノルズ数の -0.5 乗に比例すると判断し、式(4)の仮定のもとに図-9を作製した。

$$f = a \cdot (H/d') / Re^{0.5} \quad (4)$$

ここに、 a :定数である。

図-9より、各プロットは、直線回帰による表現が可能と考えられる。そこで、この実験結果よりその回帰式を求めると式(5)が得られた。この場合、相関係数は 0.83 である。

$$f = 264 \cdot (H/d') / Re^{0.5} \quad (5)$$

次に、式(5)により算出した f を用いた透過率の計算

値と、同条件の実験値を比較すると、両者の誤差の割合は±20%以内に総数の8割強が存在し、式(5)の妥当性が確認された。

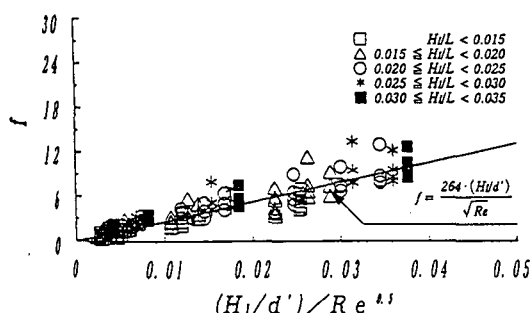


図-9 線形抵抗係数の回帰分布

4. 波変形に関する実験の信頼性と縮尺限界

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、水理模型実験は有力な予測手段である。その際、粘性力よりも重力や慣性力が卓越する現象であることから、フルード則が用いられる。しかしながら、多くの水理現象では粘性の影響を受けることが明らかで、Delmonte³⁾ や服部ら⁴⁾ も透過性構造物による波変形を考える際、レイノルズ数の重要性を指摘している。しかし、現状ではモデルと現地のレイノルズ数が数倍から十数倍も異なっているにもかかわらず、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縮尺限界について検討する。

4.1 線形抵抗係数の相似則

線形抵抗係数の相似性についてはレイノルズ数の効果も考慮した式(5)に基いて検討する。現地とモデルの線形抵抗係数を次のように表わす。

$$f_p = 264 \frac{(H1)_p}{(d')_p} \frac{\sqrt{v}}{\sqrt{(u_0)_p} \sqrt{(d')_p}} \quad (6a)$$

$$f_m = 264 \frac{(H1)_m}{(d')_m} \frac{\sqrt{v}}{\sqrt{(u_0)_m} \sqrt{(d')_m}} \quad (6b)$$

ここに、添字 p, m は現地およびモデルの諸量である。

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上げると、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

$$f_p = f_m \quad (7)$$

の関係が成立しなければならない。

この関係から空隙代表径と入射波高の比を求め、縮尺(n)を用いると次のようになる。

$$\frac{(d')_m}{(d')_p} = \left[\frac{(H1)_m}{(H1)_p} \right]^{1/3} = n^{1/3} \quad (8)$$

この式(8)の両辺は幾何学的な縮尺を表しているにもかかわらず、異なった内容を示している。

これまでの透過堤による波変形の実験は、異形ブロックの大きさも模型縮尺としているが、式(8)の結果によると、 $f_p = f_m$ とはならないため、現地とモデルの線形抵抗係数が異なることが予想される。このことから、現実問題として、レイノルズ数の相似則を完全に満足するような波変形の模型実験は不可能であり、レイノルズ数の影響の少ない範囲で実験することが必須となろう。

4.2 模型実験の信頼度と縮尺限界

ブロック積み堤による波変形の実験によれば、図-8に見られるように、粒径レイノルズ数の増加にともない、線形抵抗係数は指数関数的に減少するが、ある粒径レイノルズ数の領域で f の変化は微弱となり、波の変形に対して大きな影響を与えない。このような粒径レイノルズ数の限界値を $(Re)_c$ で表わす。

いま、透過性構造物による波変形の実験を行なうにあたり、実験上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、図-10に示すように、次の2つのケースが考えられる。

(1) ケースⅠ: $(Re)_m < (Re)_c$ の場合

f_m は $(Re)_m$ の減少にともない、急激に大きくなる領域であり、現地の f_p に比べ、かなり大きくなる。このため、このような範囲で透過堤の模型実験を行なうと、透過波高やこれに伴う波力などを過小評価することになる。

(2) ケースⅡ: $(Re)_m > (Re)_c$ の場合

$(Re)_m$ の値にかかわらず f_m はほとんど変化せず、ほぼ一定と考えてよい。このため、この領域の $(Re)_m$ で行なわれた波変形に関する実験結果においてはレイノルズ数の影響は無視してよく、その再現性は高いと考えられる。

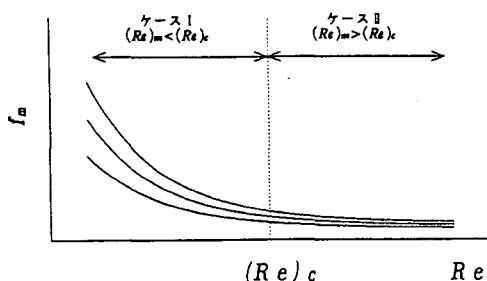


図-10 粒径レイノルズ数の限界

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。図-8における f_m の変動傾向からみて、限界レイノルズ数は $(Re)_c = (4 \sim 6) \times 10^4$ 程度と考えてよいようである。これを具体的な現地条件と模型縮尺の関係で検討してみる。

いま、6.3ton型テトラポッド乱積み構造物による波の変形を模型実験で再現する場合を考え、設置水深5m、入射波の波高2m、周期10.0secを想定し、模型縮尺が1/10、1/20、1/30および1/50の場合の粒径レイノルズ数を

表-4に示す。

表-4より、 $(Re)_c = (4 \sim 6) \times 10^4$ であれば、このような実験における限界の模型縮尺は1/20程度であり、1/30あるいはこれ以上の小規模な模型の場合は粘性の影響が大きく、実験に対する信頼度に欠けることになる。したがって、このような縮尺を採用すべきでないことは明白であり、模型縮尺の安易な選定は避けるべきであろう。

表-4 模型縮尺と粒径レイノルズ数

模型縮尺 n	現 地	1/10	1/20	1/30	1/50
設置水深 h (cm)	500	50	25	16.7	10
入射波高 H (cm)	200	20	10	6.7	4
長波の水平水粒子速度 U (cm/sec)	140.00	44.27	31.30	25.66	19.80
空隙代表径 d' (cm)	168.4	16.84	8.42	5.61	3.37
補正前の粒径レイノルズ数 Re^*	2.36×10^6	74600	26400	14400	6700
流速倍率 M	2.000	1.999	1.997	1.963	1.762
補正後の粒径レイノルズ数 Re	4.72×10^6	149100	52800	28300	11800

計算条件 $\left\{ \begin{array}{l} 6.3\text{ton型テトラポッド乱積み構造物(空隙率50\%) \\ \text{入射波の周期 } 10.0\text{sec } (h/L=0.07) \end{array} \right\}$

5. 結言

透過性構造物における波変形に関する水理模型実験について考察を行なった。

その結果、①振動流中の透過層において、空隙内の流速は粒径レイノルズ数に大きく依存する。②直立透過堤における線形抵抗係数は波高・空隙代表径比と線形関係にあり、かつ、粒径レイノルズ数の-0.5乗に比例する、という実験事実を前提にすれば、③模型の空隙長さは、模型縮尺の1/3乗に縮めなければならないが、このことに対する現実的な対応は難しい。また、④模型における粒径レイノルズ数が $(4 \sim 6) \times 10^4$ 程度よりかなり小さい場合、現地の値よりはるかに大きい線形抵抗係数が出現しているはずであり、実験上の数値、例えば透過波高や

それに基く波力は過小に計測されることになる。

したがって、模型実験の信頼度を高め、その再現性を保持するためには、縮尺に限界があり、粒径レイノルズ数を指標として模型縮尺を選定する必要がある。

謝辞

この研究の遂行にあたり、樫木 亨 大阪大学名誉教授(現大阪産業大学教授)に懇篤なご指導を賜わった。また、江藤剛治 近畿大学教授には実験装置、計算プログラムなど全面的なご指導、ご協力を頂いた。ここに記して深甚の謝意を表します。

参考文献

1) Somchai Rojanakamthorn・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, 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) 樫木亨・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) 樫木亨・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・樫木亨・須貝輝博:超高速ビデオカメラを用いた透過性構造物内部の流体運動可視化に関する実験, 海洋開発論文集, 土木学会, vol.10, pp.307-312, 1994.