

消波工を持つ直立壁の作用波圧に対するブロックスケールとレイノルズ数の効果

Effect of Block Scale and Reynolds Number for Wave Pressure on Upright Seawall Provided with Wave Absorbing Works

井田 康夫*・萩原 照央**・小鯛 光彦***

Yasuo Ida・Teruo Hagihara・Mitsuhiro Kodai

Effect of block scale and Reynolds number on model experiment of wave pressure was examined on upright seawall provided with wave absorbing works in shallow water region.

Wave pressure obtained decreases exponentially with an increase with following parameters : ratio of incident wave height to block scale, H_I/d' , Reynolds number, Re , ratio of width of wave absorbing works to wave length, B/L and ratio of width of wave chamber to wave length, l/L .

In case of l/L is less than 0.2 wave pressure has become 1.4 times of standing wave pressure.

Keywords : Wave pressure, Upright seawall, Wave absorbing works, Block scale, Reynolds number.

1. 緒言

近年の沿岸域を積極的に利用しようとする気運は、環境保全やコスト縮減の要請と調和させつつ様々な消波構造物を産み出している。顧みれば消波ブロックの開発以来、これを被覆層に用いた夥しい数の防波堤や護岸などが施工され、消波工として波力低減や侵食防止に大きく貢献してきた。また最近では新材料、新形式の消波構造物も考案され、その発展は目覚ましい。

これらの消波構造体による波力の低減効果については構造特性にかかわらず総体的に低減率を乗じてその評価を行なう手法が一般に用いられている。しかし消波工に用いられるブロックの大きさや消波堤体の位置(遊水部の有無など)が後方の直立壁の作用波力におよぼす影響など、構造物の特性と波力低減の関係については不明確な点も多い。

著者らは既報^{1), 2), 3), 4)}のように、浅海域における透過性構造物による波の変形が、①波と空隙の大きさの相対比(波高・空隙代表径比)、②粒径レイノルズ数の2つの無次元量に大きく支配されることを明らかにした。そしてこれらを用いて線形抵抗係数を算出し、透過率の算定が可能であることを示した。

このような波の変形に係わる2つの重要な無次元量は当然の結果として消波工などの後方に設けられた直立壁の作用波圧にも著しい影響をもたらす。

そこで本研究では消波工を持つ防波堤や護岸、遊水部を持つ消波岸壁などを想定し、重複波領域において入射波の特性、消波工の構造ならびに形状特性を変化させ、波と空隙の大きさの相対比と粒径レイノルズ数が後方壁面の作用波圧におよぼす効果について実験的に検討したものである。

2. 作用波圧に関する無次元量

消波工を持つ直立壁に作用する波力について検討する前に、消波構造物による波の変形について概説する。

ブロック積み堤のような透過性構造物が図-1のように水平床上に設置された場合、波の変形は次の物理量が関係する。

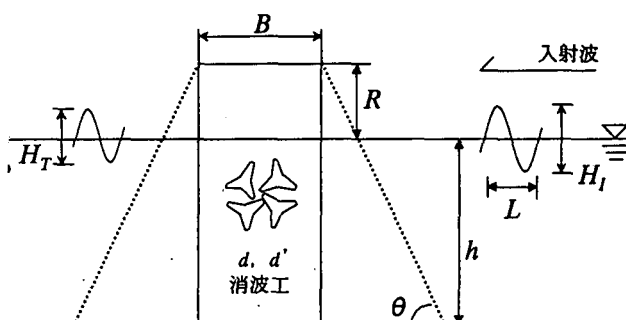


図-1 透過性構造物

- (1) 入射波特性[設置水深(h)、入射波高(H_I)、周期(T)または波長(L)]
- (2) 構造物の材料特性[材料の形状、個体の大きさ(d)または空隙の代表長(d')、空隙率(ε)]
- (3) 構造物の形状特性[堤体幅(B)、天端高(R)、斜面勾配(θ)]

このように波の変形には多くの変数が関係するが、筆者らは長波領域において、テトラポッド模型を用いた直立堤を対象に行なった多数の透過率実験から次式の結果を得ている。

*正 会 員 大阪工業大学工学部

**学 生 会 員 大阪工業大学大学院工学研究科

***古久根建設(株)

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

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

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 ：長波の最大水平水粒子速度(U)による粒径レイノルズ数(Ud'/ν)、 ν ：水の動粘性係数。

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_I/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。

次に、図-2 (b)に示すように消波構造物の後方に任意の遊水部幅を持つ直立壁を想定し、この壁面に作用する無次元波力を考える。

この場合、直立壁の作用波圧の基になるのは消波工を透過した波であり、無次元波圧に対して前述の波高・空隙代表径比ならびに粒径レイノルズ数が重要な無次元量となることは明らかである。加えて、消波工内部および遊水部における波の反射・反復現象から相対堤体幅(B/L)および相対遊水部幅(l/L)も重要な要素であることは既往の多くの研究から明白である。

以上のことから消波工を持つ直立壁の作用波圧に関し、波高・空隙代表径比(H_I/d')、粒径レイノルズ数(Re)、相対堤体幅(B/L)および相対遊水部幅(l/L)に着目して実験的に検討を行なうこととする。

3. 実験概要

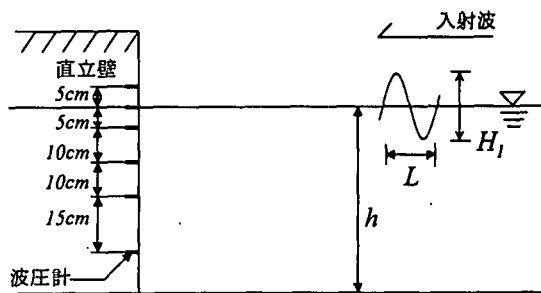
(1) 実験装置と方法

実験は図-2に示すように長さ50m、高さ1.2m、幅0.8mの2次元造波水槽に、波圧計を中心部に埋め込んだ不透過壁を構築し、これに所定の入射波を作用させて波圧を測定した。波圧計の位置は $z=0$ (静水面)の他 $z=5, -5, -15, -25, -40$ cmで、合計6点である。

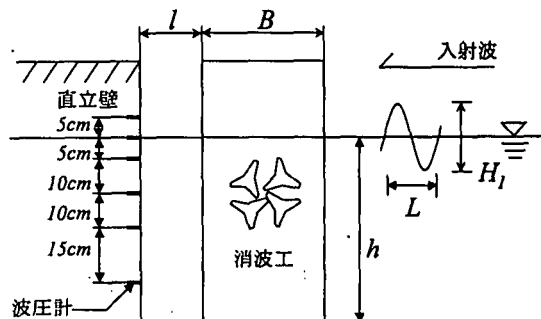
最初に消波工の無い状態で波圧を計測し、サンフルー式による波圧分布と比較検討した上、次に各種の消波工を設置して、消波工がある状態の波圧を計測した。

この消波工はテトラポッド模型を越波しない高さまで乱積みしたもので、金網で被覆された直立型である。

なお入射波高は容量式波高計で、そして波圧は容量100gf/cm²の圧力変換器を用いて計測し、最大同時波圧により波圧データの整理を行なった。



(a) 消波工が無い場合



(b) 消波工がある場合

図-2 実験概要

(2) 実験の種類

入射波は水深 h をすべて50cmとし、波高 $H_I=3.9\sim 14.4$ cm、波長 $L=405\sim 593$ cmの範囲にある12種類である。堤体に使用したテトラポッド模型は高さ $d=4.5$ cm(空隙代表径 $d'=2.9$ cm)と $d=7.2$ cm(空隙代表径 $d'=4.6$ cm)の2種類である。空隙代表径とはテトラポッドを乱積みにした場合の空隙率が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。堤体幅 B はそれぞれ20cmおよび40cmの2種類を使用した。また遊水部幅 l については0, 10, 20, 40, 100cmの5種類とした。実験の主要な指標は相対水深 h/L が0.084~0.123、波形勾配 H_I/L が0.010~0.024、波高・空隙代表径比 $H_I/d'=0.848\sim 4.966$ 、粒径レイノルズ数 $Re=2700\sim 15300$ 、相対堤体幅 $B/L=0.034\sim 0.099$ 、相対遊水部幅 $l/L=0\sim 0.247$ である。これらの詳細を表-1および表-2に示す。

表-1 入射波の諸元

水深	h (cm)	50
波高	H_I (cm)	3.9~14.4
周期	T (sec)	2.0~2.8
波長	L (cm)	405~593
相対水深	h/L	0.084~0.123
波形勾配	H_I/L	0.010~0.024
波の個数		12

表-2 構造物の諸元

ブロック高さ	d (cm)	4.5, 7.2
空隙代表径	d' (cm)	2.9, 4.6
堤体幅	B (cm)	20, 40
遊水部幅	l (cm)	0, 10, 20, 40, 100
波高・空隙代表径比	H_1/d'	0.848~4.966
粒径レイノルズ数	Re	2700~15300
相対堤体幅	B/L	0.034~0.099
相対遊水部幅	l/L	0~0.247

4. 考察

以下の記述において波圧および波力を次のように表記する。消波工が無い場合の直立壁の作用波圧について、実験値は添字 0 を付けて、最大波圧を pm_0 、これを含む波圧合力を P_0 とし、サンフルー値には同様に添字 s を付けて pms ならびに P_s とする。そして消波工を設置した場合の直立壁の作用波圧については最大波圧を pm 、波圧合力を P で表すこととする。

(1) 消波工が無い場合の作用波圧

消波工による直立壁への作用波圧の変化を検討する前段階として、消波工が無い場合の作用波圧について考察する。

図-3 に波圧分布の実験結果例を示す。図中の破線はサンフルー式による計算値である。

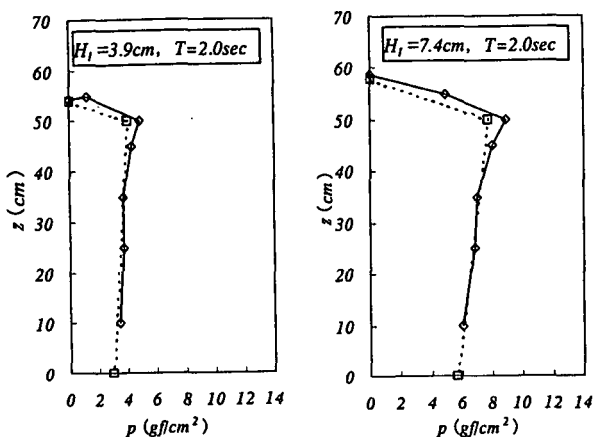


図-3 (1) 波圧分布

図-3 (2) 波圧分布

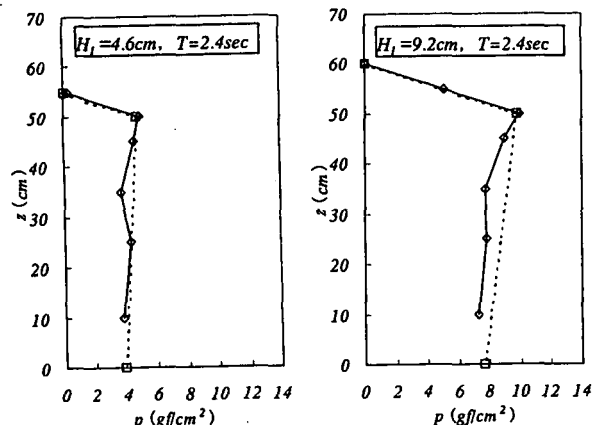


図-3 (3) 波圧分布

図-3 (4) 波圧分布

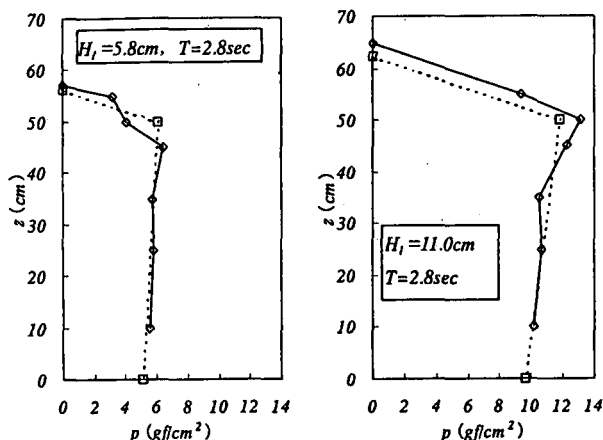


図-3 (5) 波圧分布

図-3 (6) 波圧分布

これらの図から実験波圧とサンフルー式による計算波圧を比較すると、波圧分布の形、大きさとも両者は類似しており、水面付近の最大波圧 pm_0 と pms は最大 1.8 gf/cm^2 の差、そして波圧合力 P_0 と P_s は最大 87 gf/cm の差で、これらの実験波圧と計算波圧の差異の割合は平均 7.6% 程度である。したがって両者はこの実験の範囲においてはほぼ一致していると考えられることから、以下の消波工による波圧低減を考える場合の基準値として実験波圧 (pm_0 , P_0) を用いることとする。

(2) 消波工がある場合の作用波圧

① 波圧分布

消波工がある場合の波圧分布の代表例を図-4~図-8 に示す。これらの図には比較のため消波工が無い場合の波圧分布も▲印で示している。

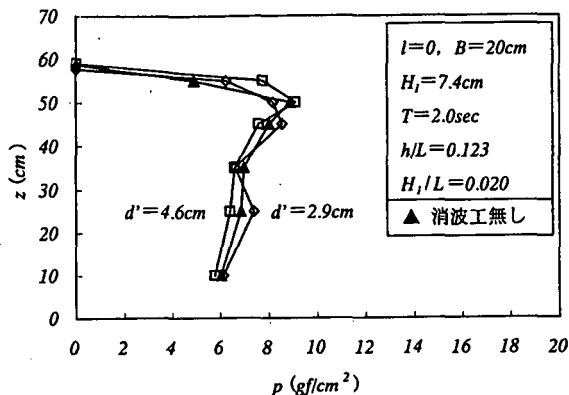


図-4 波圧分布 (d' の差)

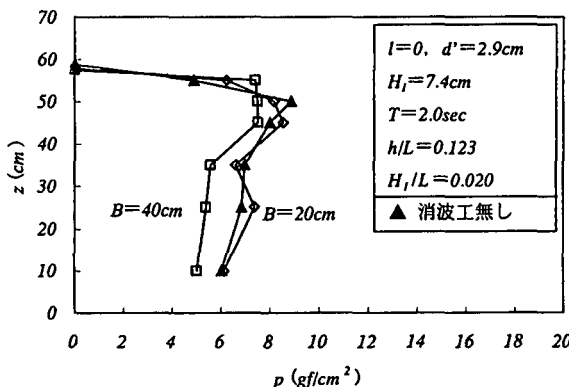


図-5 波圧分布 (B の差)

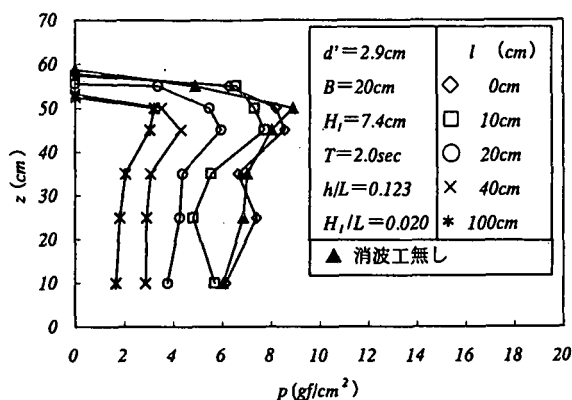


図-6 波圧分布 (l の差)

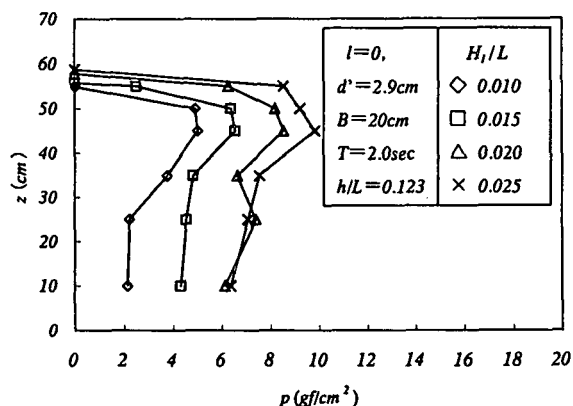


図-7 波圧分布 (H_1/L の差)

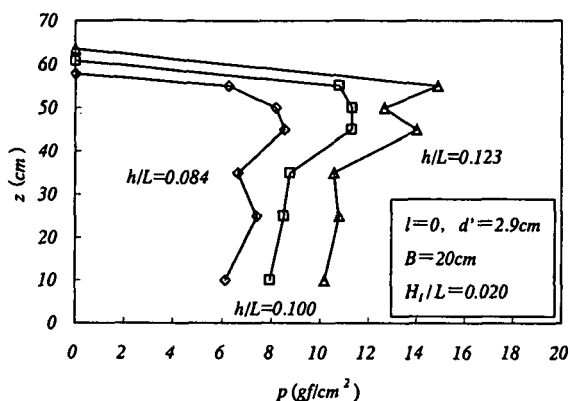


図-8 波圧分布 (h/L の差)

以上の図で、図-4は消波工の構成材料の空隙径 (d') の差、図-5は堤体幅 (B) の差、図-6は遊水部幅 (l) の差、図-7は波形勾配 (H_1/L) の差、そして図-8は比水深 (h/L) の差を表しているが、いずれもそれぞれの条件の違いにより波圧分布は相応に異なっている。そこで次項では数量的な差異について検討する。

②波圧低減率

消波工による波圧の低減効果を表す指標として、消波工が無い場合の波圧に対する低減率を用い、次のように定義する。

$$\left. \begin{aligned} \text{最大波圧低減率} \quad m &= \frac{P_m}{P_{m0}} \\ \text{波力低減率} \quad M &= \frac{P}{P_0} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここに、 p_m , P : 消波工がある場合の直立壁に作用する最大波圧および波力

p_{m0} , P_0 : 消波工がない場合の直立壁に作用する最大波圧および波力

以下にこの m , M と波高・空隙代表径比 (H_1/d')、粒径レイノルズ数 (Re)、相対堤体幅 (B/L)、相対遊水部幅 (l/L) の関係を検討する。

a. 波高・空隙代表径比の効果

図-9(1)および図-9(2)は Re , l/L の値を固定した場合の、 B/L ごとの m と H_1/d' の関係を、そして図-9(3)は同様に M と H_1/d' の関係を示した例である。これらの図から m , M はともに H_1/d' の増大にともなって明らかに減少することがわかる。

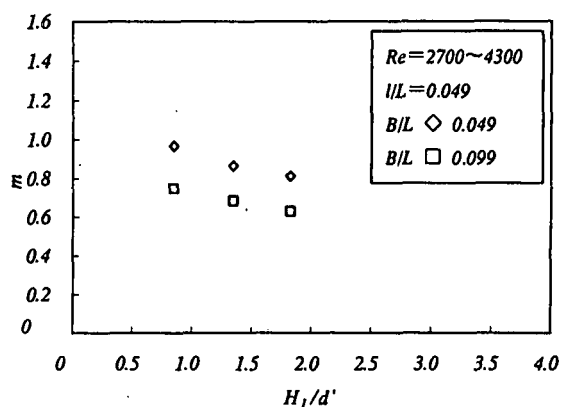


図-9(1) m と H_1/d' の関係

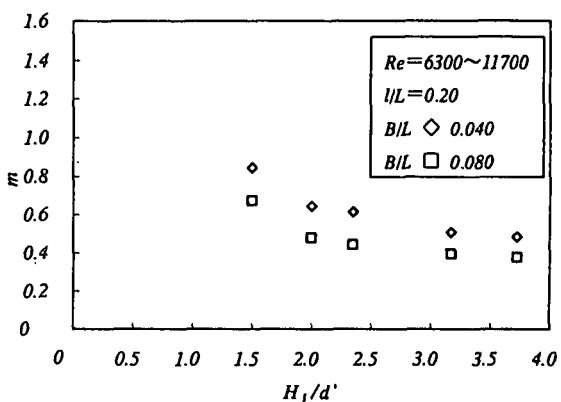


図-9(2) m と H_1/d' の関係

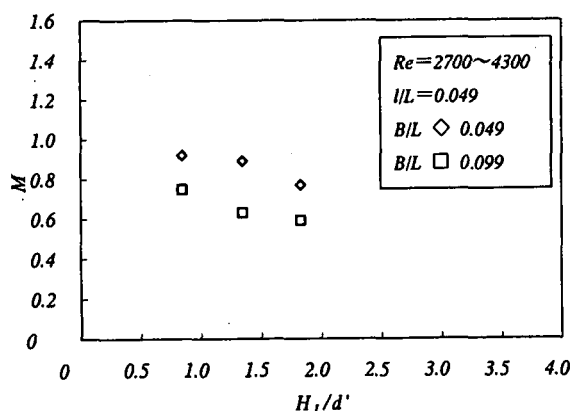


図-9(3) M と H_1/d' の関係

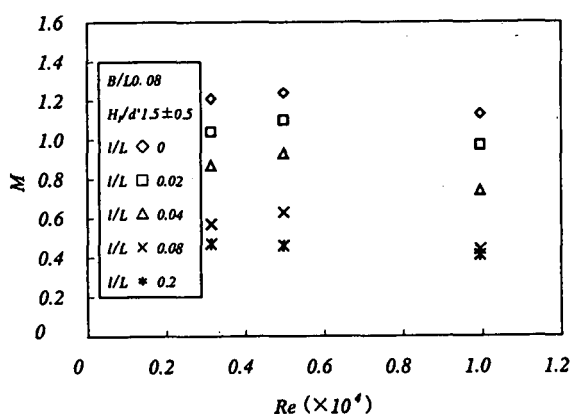


図-10(3) M と Re の関係

b. 粒径レイノルズ数の効果

図-10(1)および図-10(2)は B/L , H_1/d' を固定した場合の, l/L ごとの m と Re の関係を, そして図-10(3)は同様に M と Re の関係を表した一例である。これらの図から m ならびに M は Re の増大とともに全体的に減少している。しかし, 図-10(1)および図-10(3)において $Re \approx 0.5 \times 10^4$ 近辺で極大値が認められる。このような低レイノルズ数領域では波変形の場合にも線形抵抗係数が敏感に変化し, 透過率に影響を与えたが, m , M の極大傾向がこれと同様に有意なものであるのか判断しがたい。

c. 相対堤体幅の効果

図-11(1)および図-11(2)は H_1/d' , l/L を固定し, Re ごとの m と B/L の関係を, そして図-11(3)は同様に M と B/L の関係を整理した例である。これらの図より, 当然のことながら他の条件が同じならば B/L の増大にともない m , M はともに減少することが確認された。

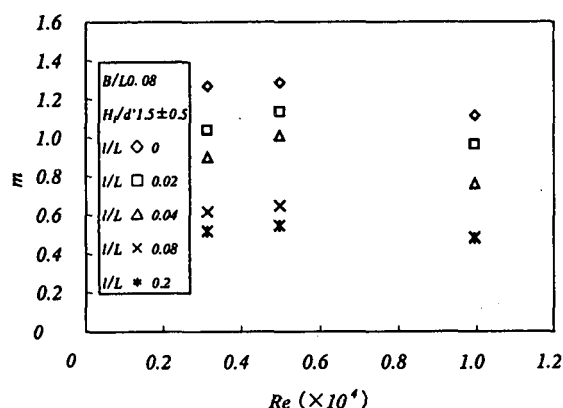


図-10(1) m と Re の関係

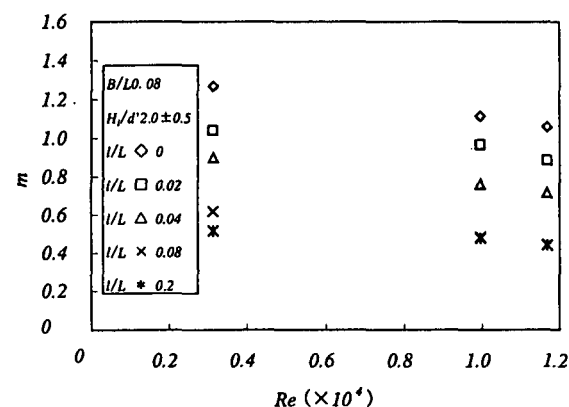


図-10(2) m と Re の関係

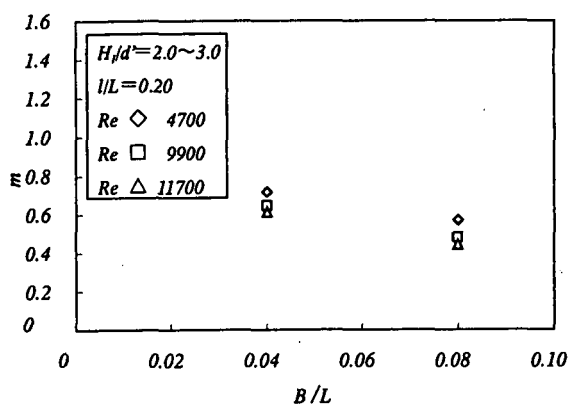


図-11(1) m と B/L の関係

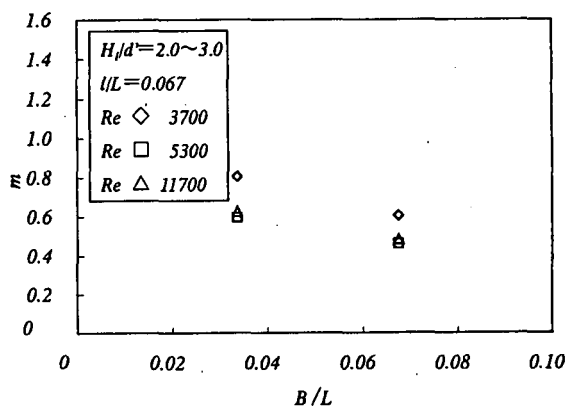


図-11(2) m と B/L の関係

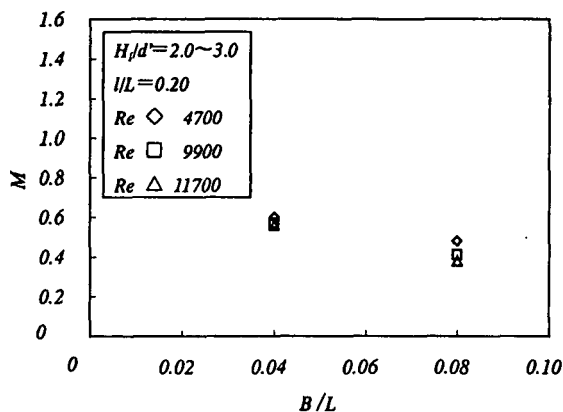


図-11(3) M と B/L の関係

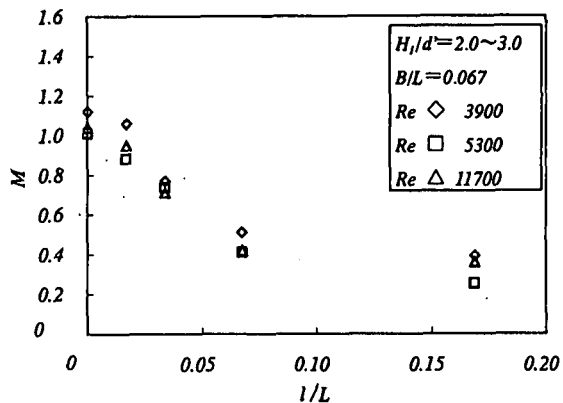


図-12(3) M と l/L の関係

d. 相対遊水部幅の効果

図-12(1)および図-12(2)は H_1/d' , B/L を固定し, Re ごとの m と l/L の関係を, そして図-12(3)は M と l/L の関係を示した例である。これらの図から l/L の増大とともに m および M は急減するが, $l/L \approx 0.08$ より大きい領域では減少の割合は微弱となる。そして, $l/L = 0 \sim 0.02$ のように遊水部幅が短い場合には m および M が1以上となるケースが多く, 消波工が無い場合より波圧は大きくなることがわかる。

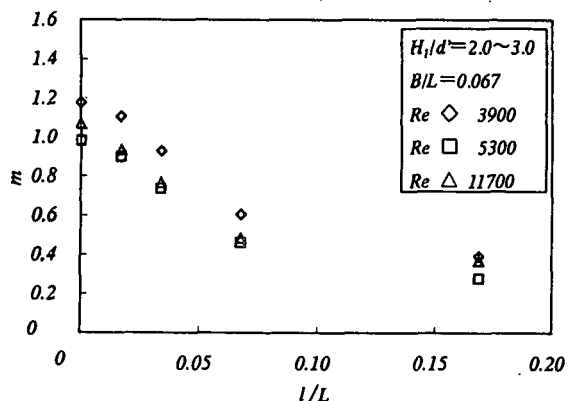


図-12(1) m と l/L の関係

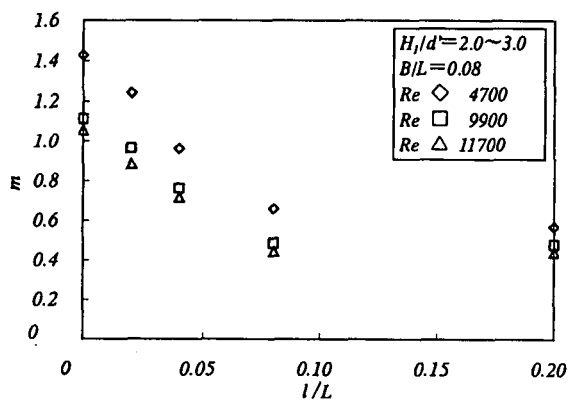


図-12(2) m と l/L の関係

5. 結言

消波ブロック積み堤などの透過性構造物による波の変形に際し, 波と構造物材料の相対比(波高・空隙代表径比)ならびに粒径レイノルズ数が大きく関係することから, これらの消波構造物の後方に設置される直立壁の作用波圧にもこのような無次元量が重要な影響を与えることを予測し, 重複波を対象に実験的に検証した。併せて, 相対堤体幅, 相対遊水部幅と作用波圧の関係についても検討を加えた。得られた結果を以下に要約する。

- (1) 消波工が無い場合, 直立壁の実験波圧とサンフルー式による計算波圧は波圧分布図上の最大波圧ならびに波圧合力ともかなり一致する。
- (2) 消波工が無い場合と比べた消波工がある場合の波圧の低減率は波高・空隙代表径比, 粒径レイノルズ数, 相対堤体幅および相対遊水部幅の増大とともに減少する。
- (3) 相対遊水部幅が0または小さい領域では, 消波工が無い場合よりも最高1.4倍程度まで波圧が大きくなるケースがかなり認められる。

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, pp287-291, 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, pp155-159, 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), pp616-620, 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, pp537-542, 1997.