

消波工の持つ減勢機能におよぼす 粒径レイノルズ数の効果

EFFECT OF REYNOLDS NUMBER ON WAVE FORCE REDUCTION
BY WAVE ABSORBING WORKS.

井田 康夫¹・中村 晋太郎²・森 康祐³
Yasuo IDA, Shintaro NAKAMURA and Kosuke MORI

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 大阪府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 大阪府大阪市旭区大宮五丁目-16-1)

³安積建設株式会社 (〒573-1162 大阪府枚方市田口四丁目-59-8)

Effect of energy dissipation from the viewpoint of the Reynolds number to clear the wave dissipation performance of the permeable breakwater, was experimentally investigated. And, this experiment was carried out for the wave pressure on the upright seawall that was put behind the absorbing works.

Then, the result was the following. At present, m is the ratio of largest wave pressure as there was the absorbing works, p_m and largest wave pressure as there was without the absorbing works, p_{m_0} . And m clearly decrease with the rise in the Reynolds number Re and the dimensionless quantity H_l/d' . Now the incident wave height, H_l and the representative diameter of void, d' . In addition m is found between 0.23 and 0.93.

Key Words : Wave pressure, upright seawall, Reynolds number

1. 緒言

近年の沿岸域の整備は環境保全、景観の維持・向上、コスト削減をはかりつつ、大水深・高波浪領域にまでおよんでいる。そして建設目的に応じた波浪制御を行なうため多種多様な構造物が開発され、実施に移されている。これらの構造物には空隙を有効に活用した透過性構造物も多く、上部パイラー型防波堤などもその一例である。

しかし、それら新型の構造物が台頭するなかで、消波ブロック被覆堤のような構造物前方にブロックを装備した防波堤や護岸も確実な減勢効果が期待できることから依然根強く利用されている。

このようなブロック積み構造物の基本特性に関し、著者らは既に、長波近似領域におけるブロック構造物内の抵抗則が、線形抵抗係数で表現でき、その線形抵抗係数を構成するパラメーターが①入射波高とブロックの空隙代表長さの相対比(波高・空隙代表径比)と②粒径レイノルズ数の2つの無次元量であることを明らかにした。このことは当然ながら、消波工を持つ直立壁の作用波圧についても重要な指標となる。

一方、実務においては消波機能を持つ構造物の作用波圧の算定には、合田式の準用や森平式などが用いられる。これらの式は低減率という形で消波工の減勢効果を評価するものであるが、低減率は一定値が用いられ、構造特性が反映されていない。

これらのことから著者らは一昨年来、消波工背後の直立壁における波圧、波力と、波高・空隙代表径比ならびに粒径レイノルズ数の関係を考察してきた。

しかしながら実験対象とした粒径レイノルズ数の範囲が狭く、減勢機能の解析においては十分な検証にいたっていない。

そこで本論文では碎波も含む領域において、消波工の減勢機能を波圧ならびに波力低減効果としてとらえ、広範な粒径レイノルズ数の領域において、波高・空隙代表径比および相対遊水部幅を変化させて明らかにし、その上で合田式の準用や森平式による算定波力と比較した。そして消波工の離岸距離が背後の直立壁の作用波圧におよぼす影響を見るため、著者らが既に提示した線形抵抗係数を導入した透過率算定式により消波工通過後の波高を算定し、これを用いた波力値を合田式で求め、実験値との比較検討を行なった。

2. 実験概要

(1) 実験装置と方法

長さ 50m, 高さ 1.2m, 幅 0.8m の 2 次元造波水槽に, 図-1 に示した断面をもつ模型を構築した。

模型は, 高さ 30cm, 水平部幅 60cm, 斜面勾配 1 : 3 の不透過マウンドを置き, その背後に容量 100gf/cm² (9.8kPa), 固有振動数 2kHz の波圧変換器を中心部に埋め込んだ直立壁を設置したものであり, 波圧は $z = -15, -10, -5, 0, 5, 10, 15\text{cm}$ の位置において, サンプル速度 2ms で計測を行なった。なお図-1 に示すマウンド上の消波工は金網で被覆された直立型で, 越波しないよう所定の高さまでテトラポッド模型が詰められるようになっている。

入射波高 H_i は模型を設置しない状態で, 容量式波高計により計測した。

波圧の計測は直立壁と不透過マウンドの模型を設置し, まず消波工がない状態で最大同時波圧ならびに波力を計測し, サンプル式・広井式・合田式と比較した。

そして大きさの異なるテトラポッド模型を用いて, 消波工を設置し, 消波工がある状態で最大同時波圧ならびに波力を計測し, 森平式・合田式の準用 (低減率 λ を導入したもの) と比較した。そしてさらに著者らが示した透過率算定式により消波工背後の透過波高 H_T を算定し, これを用いて合田式により最大波圧や波力を算定して実験値と比較検討した。

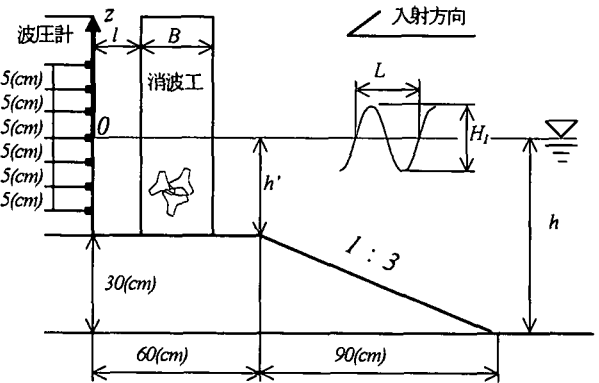


図-1 実験装置の概要

(2) 実験の種類

入射波はすべて規則波とし, 堤脚水深 $h = 50\text{cm}$, 波高 $H_i = 10.6 \sim 21.2\text{cm}$, 波長 $L = 256 \sim 453\text{cm}$ の範囲にある 15 種類の波を堤体に作用させた。

消波工として使用したテトラポッド模型は 3 種類であり, 各々のブロック高さ d は 4.5, 7.2, 12.2cm ($d' : 3.7, 5.8, 9.9\text{cm}$) である。ここで () 内の空隙代表径 d' とは, ブロック 1 個の体積と同体積の球の直径である。堤体幅 B は 20cm と固定し, 遊水部幅 (離岸距離) l は 0, 10, 20cm と変化させた。

入射波の主要な指標は相対水深 h/L が 0.110~0.195, 波形勾配 H_i/L が 0.023~0.081, 水深波高比 h/H_i が 0.94~1.89 である。一方, 構造物と入射波の複合指標は, 波高・空隙代表径比 $H_i/d = 1.071 \sim 5.732$, 粒径レイノルズ数 $Re = 9800 \sim 68800$, 相対遊水部幅 $l/L = 0 \sim 0.079$, 相対堤体幅 $B/L = 0.044 \sim 0.079$ である。これらの詳細を表-1 および表-2 に示す。ここで用いた粒径レイノルズ数は $Re = u \cdot d' / \nu$ (u : 入射波の水平最大水粒子速度, ν : 水の動粘性係数 [$0.01\text{cm}^2/\text{s}$]) である。

表-1 入射波の諸元

堤脚水深	h (cm)	50
マウンド上の水深	h' (cm)	20
波高	H_i (cm)	10.6~21.2
周期	T (s)	1.4, 1.8, 2.2
波長	L (cm)	256, 357, 453
相対水深	h/L	0.110~0.195
波形勾配	H_i/L	0.023~0.081
水深波高比	h/H_i	0.94~1.89
波の個数		15

表-2 構造物の諸元

ブロック高さ	d (cm)	4.5, 7.2, 12.2
空隙代表径	d' (cm)	3.7, 5.8, 9.9
堤体幅	B (cm)	20
遊水部幅	l (cm)	0, 10, 20
波高・空隙代表径比	H_i/d'	1.071~5.732
粒径レイノルズ数	Re	9800~68800
相対堤体幅	B/L	0.044~0.079
相対遊水部幅	l/L	0~0.079

3. 実験結果と考察

最初に以下の記述に用いる各最大波圧ならびに波力の記号とその意味を示す。

①消波工がない場合

pm_0 : 直立壁における最大波圧

P_0 : pm_0 を含む同時波圧合力

p_{s0}, P_{s0} : サンプル式による算定最大波圧ならびに波力

p_{H0}, P_{H0} : 広井式による算定最大波圧ならびに波力

p_{G0}, P_{G0} : 合田式による算定最大波圧ならびに波力

②消波工を設置した場合

pm : 直立壁における最大波圧

P : pm を含む同時波圧合力

p_M, P_M : 森平式による算定最大波圧ならびに波力

p_G, P_G : 合田式の準用 (低減率 $\lambda = 0.8$) による算定最大波圧ならびに波力

(1) 消波工がない場合の波圧特性

a) 波圧分布

図-2 は代表的な実験波圧の分布と各計算波圧の例 (2

種類) を示したものである。

実線 (◆) は実験波圧であり、二点鎖線はサンフルー式、一点鎖線は広井式、破線は合田式に基づく算定値を示している。合田式中で用いる波高 H_D は入射波高 H_I を有義波高とし、これから最大波高に換算した。

左の図は静水面 ($z = 0\text{cm}$) で実験波圧が最大となり、各算定値よりやや大きい。そして静水面下の実験波圧は、波圧位置 z が小さくなるにつれて急かつ線形的に減少し、静水面位置より高い位置の実験波圧は、概して計算波圧より小さい。一方、右の図の波圧分布は、静水面における実験波圧は各算定値とほとんど等しい。そして、静水面上の実験値は広井式、合田式による算定値よりやや小さい。一方静水面下でも実験値は比較的各算定値によく合致している。

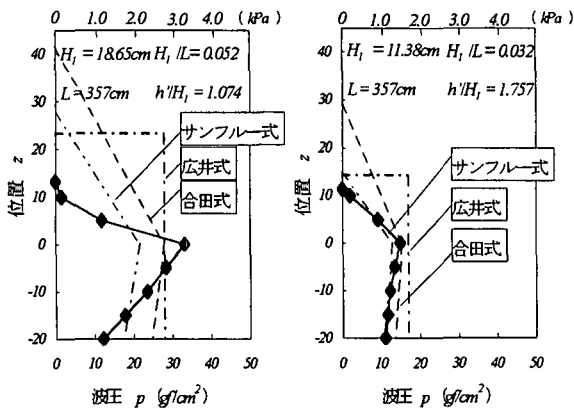


図-2 波圧分布 (消波工なし)

b) 無次元波圧・波力と水深波高比の関係

図-3は無次元波圧ならびに無次元波力 ($\phi = pm_0 / (w_0 H_I)$, $\Phi = P_0 / (w_0 H_I^2)$ [w_0 : 水の単位体積重量]) と水深波高比 (h/H_I) の関係を示したものである。

無次元波圧 ϕ は、水深波高比 h/H_I の値が $0.94 \sim 1.89$ に増加するにともない $0.64 \sim 1.10$ に増大する。また無次元波力 Φ も、水深波高比 h/H_I の増加にともない $1.38 \sim 2.91$ に増大する。 ϕ ならびに Φ は多少のばらつきがあるものの線形的に増加する傾向を示している。

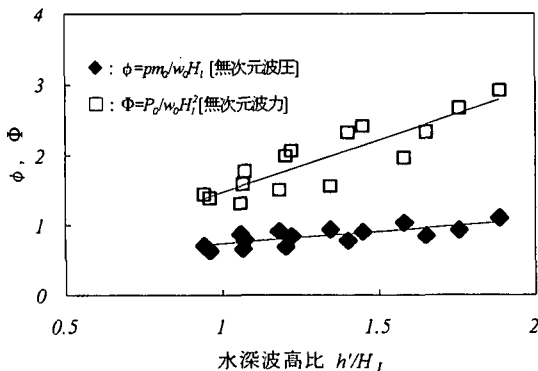


図-3 無次元波圧・波力と水深波高比

c) 実験値とサンフルー式・広井式・合田式による計算値の比較

図-4はサンフルー式、広井式および合田式の算定波圧ならびに波力を、実験値の最大波圧 pm_0 と波力 P_0 で除した値の分布領域を明らかにしたものである。

この図によると、実験値とサンフルー式による算定値とを比較した値 (p_{so}/pm_0 , P_{so}/P_0) は、 $0.62 \sim 0.97$ ならびに $0.93 \sim 1.54$ の範囲にあり各々の算術平均 ($\overline{p_{so}/pm_0}$, $\overline{P_{so}/P_0}$) は 0.80 および 1.17 であった。また実験値と広井式による算定値とを比較した値 (p_{ho}/pm_0 , P_{ho}/P_0) は、 $0.84 \sim 1.28$ ならびに $1.62 \sim 2.65$ の範囲にあり各々の算術平均 ($\overline{p_{ho}/pm_0}$, $\overline{P_{ho}/P_0}$) は 1.04 および 2.06 であった。さらに実験値と合田式による算定値とを比較した値 (p_{go}/pm_0 , P_{go}/P_0) は、 $0.77 \sim 1.36$ ならびに $1.16 \sim 2.99$ の範囲にあり各々の算術平均 ($\overline{p_{go}/pm_0}$, $\overline{P_{go}/P_0}$) は 0.98 および 1.84 であった。

単純に算術平均だけみると、実験値に対して、 p_{so} は過小評価ぎみに、 p_{ho} と p_{go} および P_{so} は等しく、 P_{go} および P_{ho} は過大評価ぎみである。

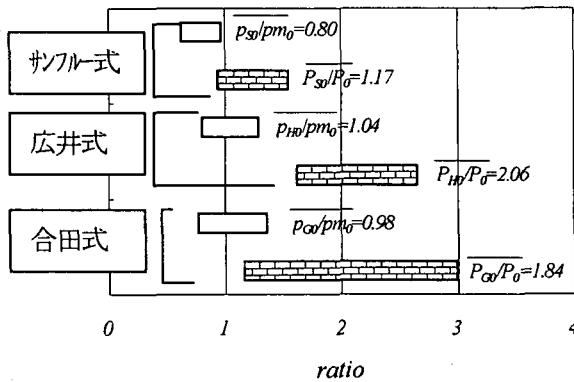


図-4 実験値と各算定値の割合 (消波工なし)

(2) 消波工がある場合の波力低減特性

a) 波圧分布

消波工がある場合の波圧分布に関し、空隙代表径 (d')、遊水部幅 (l) のそれぞれの違いが波圧におよぼす影響を見るため、図-5と図-6を作成した。

図-5は空隙代表径の違いによる波圧分布の変化を示したものである。この図において静水面上の波圧には大きな違いは見られないが、空隙代表径が小さいほど静水面下の作用波圧は小さくなることが認められる。一般に透過率におよぼす空隙の影響は、空隙そのものの大きさと、空隙率の違いによって見られる。そして空隙率が同じ場合は、空隙の大きさが小さくなるほど透過率は小さくなる。したがって、本実験では対象を碎波領域としているものの、静水面下では規則波の周期 T とほぼ等しい時間スケールに依存する水粒子運動があり、波圧の低減効果は空隙の大きさに影響されているものと考ええる。

図-6は遊水部幅の違いによる波圧分布の変化を示し

たものである。この図において遊水部幅が大きいほど作用波圧は全計測点で均等に小さくなっている。

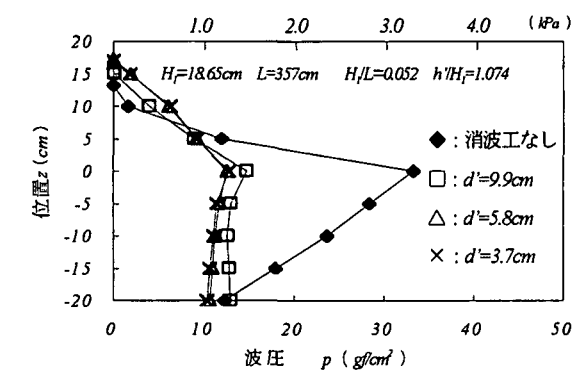


図-5 波圧分布（空隙代表径の差）

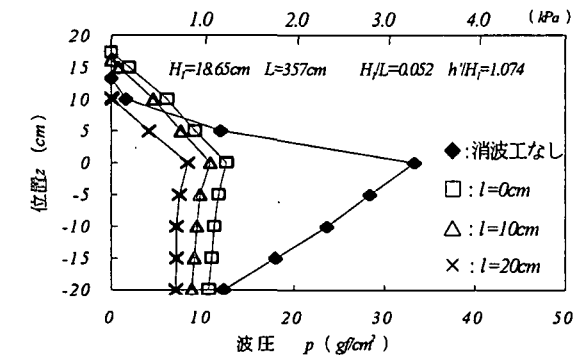


図-6 波圧分布（遊水部幅の差）

b) 実験波圧と算定波圧の比較

消波ブロックで充分被覆された直立壁に作用する波圧の算定には、森平式もしくは合田式が準用される（低減率 $\lambda=0.8$ ）。

図-7は、入射波の条件と構造物の条件が図-5で示したものと同一のものであり、実験波圧と森平式ならびに合田式の準用を比較したものである。

この図から空隙代表径 d' にかかわらず実験値は、森平式、合田式の準用による算定波圧よりすべてにおいて小さい。

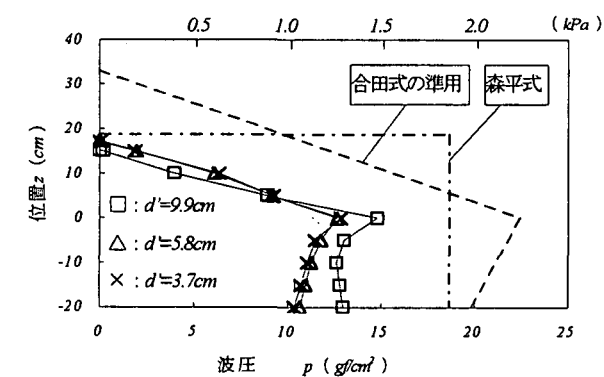


図-7 実験波圧と算定波圧

c) 実験値と森平式・合田式の準用による計算値の比較

図-8は森平式ならびに合田式の準用による算定波圧および波力を、消波工がある場合の実験値の最大波圧 p_m と波力 P で除した値の分布領域を示したものである。

実験値と森平式による算定値とを比較した値 (p_m/p_m , P_m/P_0) は、 $0.54\sim3.03$ ならびに $0.99\sim5.86$ の範囲にあり、各々の算術平均 ($\overline{p_m/p_m}$, $\overline{P_m/P_0}$) は 1.56 および 2.46 であった。また、実験値と合田式の準用による算定値とを比較した値 (p_G/p_m , P_G/P) は、 $1.00\sim3.35$ ならびに $1.30\sim5.67$ の範囲にあり各々の算術平均 ($\overline{p_G/p_m}$, $\overline{P_G/P}$) は 1.85 および 2.66 であった。

この結果、単純に算術平均だけみると、消波工がある場合の実験値は森平式、合田式の準用の場合とも波圧ならびに波力の算定値は過大評価さみである。

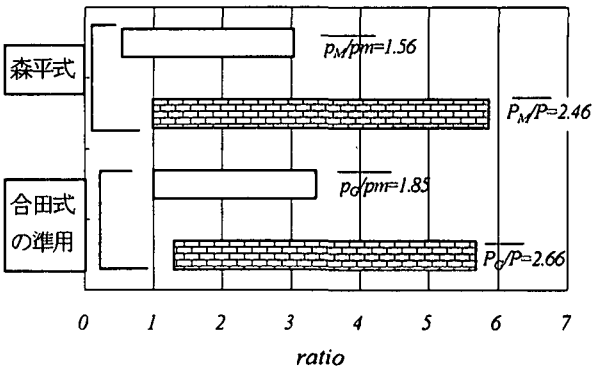


図-8 実験値と各算定値の割合（消波工あり）

d) 最大波圧および波力の低減率

消波工による最大波圧および波力の低減効果を消波工がある場合の実験値 (p_m , P) と、消波工がない場合の実験値 (p_{m0} , P_0) の比で表すこととし、次のように定義する。

最大波圧低減率 $m = p_m / p_{m0}$

波力低減率 $M = P / P_0$

図-9および図-10はこの低減率 m ならびに M と波高・空隙代表径比 H_1/d' 、粒径レイノルズ数 Re の関係を遊水部がない状態で示したものの一例である。そして図-11は低減率 m ならびに M と相対遊水部幅 l/L の関係を示したものの一例である。

図-9より、波高・空隙代表径比 H_1/d' が $1.15\sim5.73$ の範囲において m は $0.37\sim0.70$ 、 M は $0.55\sim0.72$ の範囲にある。これより低減率 m 、 M は波高・空隙代表径比の増大にともなって減少する傾向が見られる。

図-10より、粒径レイノルズ数 Re が $17600\sim59700$ の範囲において m は $0.44\sim0.66$ 、 M は $0.59\sim0.72$ の範囲にあり、低減率は m 、 M とも粒径レイノルズ数の増大にともなって減少する傾向が見られるが、 $Re > 40000$ の領域では減少の割合は小さい。

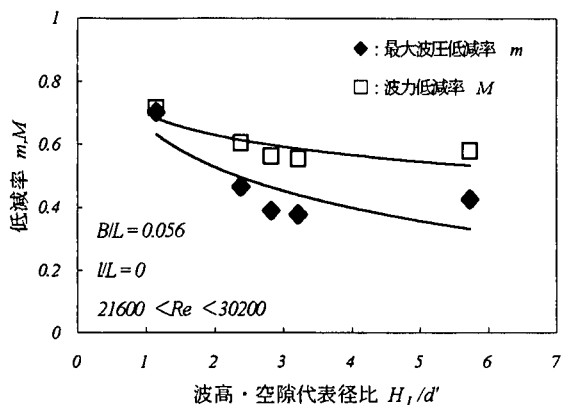


図-9 低減率と波高・空隙代表径比

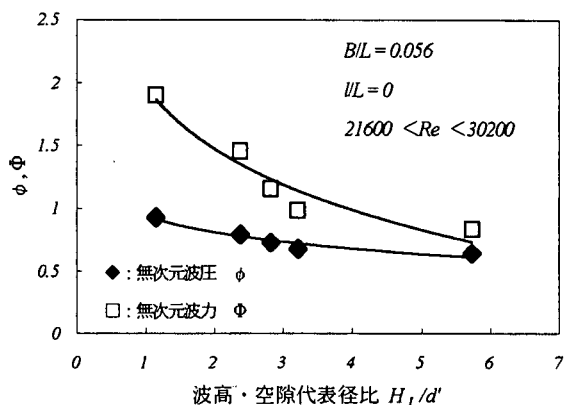


図-12 無次元波圧・波力と波高・空隙代表径比

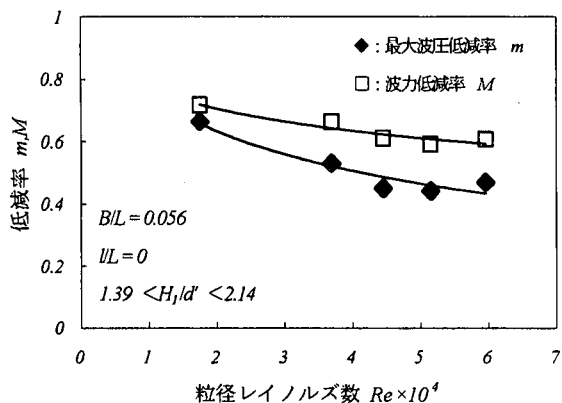


図-10 低減率と粒径レイノルズ数

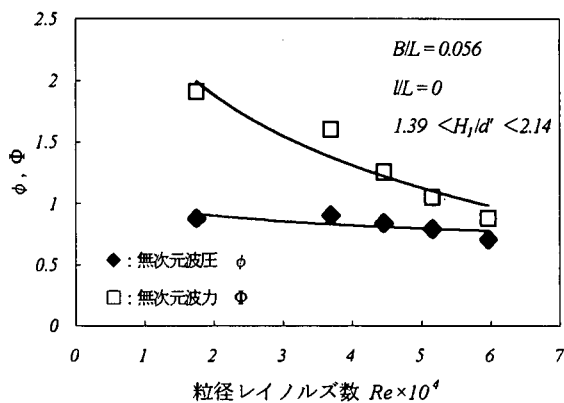


図-13 無次元波圧・波力と粒径レイノルズ数

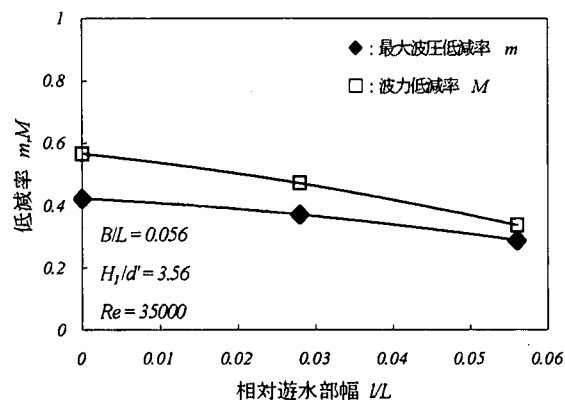


図-11 低減率と相対遊水部幅

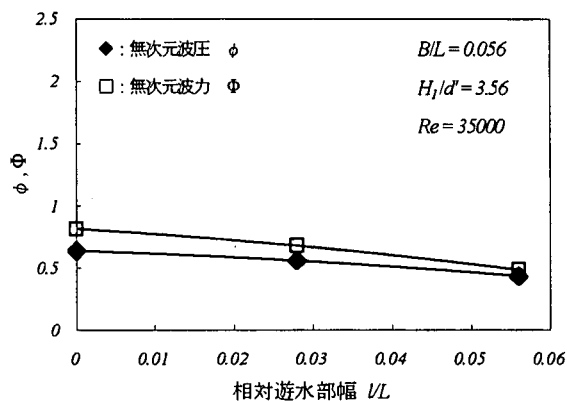


図-14 無次元波圧・波力と相対遊水部幅

図-11より、相対遊水部幅 l/L の増加にともない m は $0.42 \sim 0.29$ に、 M は $0.57 \sim 0.34$ に減少しており、相対遊水部幅の一定の効果が認められる。なお、すべてのデータにおいて最大波圧低減率 m が 1.0 を越えるケースはなく碎波が発生した時の消波工による最大波圧の低減効果が著しいことを再確認する結果となった。

e) 無次元波圧および波力と各パラメーターの関係

消波工による最大波圧および波力の低減効果を消波工がある場合の実験値 (pm , P) と入射波高もしくは入射波高の二乗相当分の静水圧 ($w_0 H_p$, $w_0 H_p^2$) の比で表すこととする。なお w_0 は水の単位体積重量である。

$$\text{無次元波圧 } \phi = pm / (w_0 H_p)$$

$$\text{無次元波力 } \Phi = P / (w_0 H_p^2)$$

図-12～図-14は無次元波圧 ϕ ならびに無次元波力 Φ と H_1/d' , Re および l/L との関係を示したものである。

図-12より、波高・空隙代表径比 H_1/d' が $1.15 \sim 5.73$ の範囲において ϕ は $0.64 \sim 0.93$, Φ は $0.83 \sim 1.90$ の範囲にあり、 Φ は波高・空隙代表径比の増大にともなって減少する傾向が見られるが、 ϕ の減少の割合は小さい。

図-13より、粒径レイノルズ数 Re が $17600 \sim 59700$ の範囲において ϕ は $0.71 \sim 0.90$, Φ は $0.87 \sim 1.91$ の範囲にあり、 Φ は粒径レイノルズ数の増大にともなって減少す

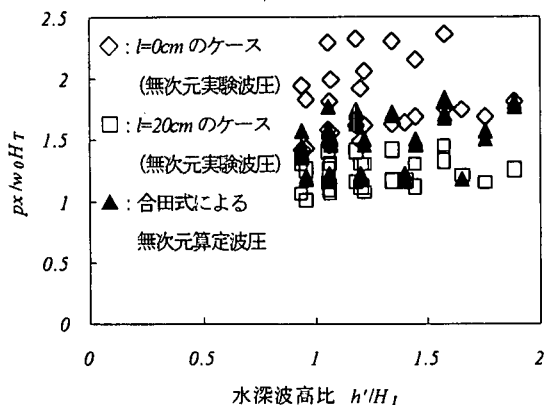


図-15 水深波高比と各無次元波圧

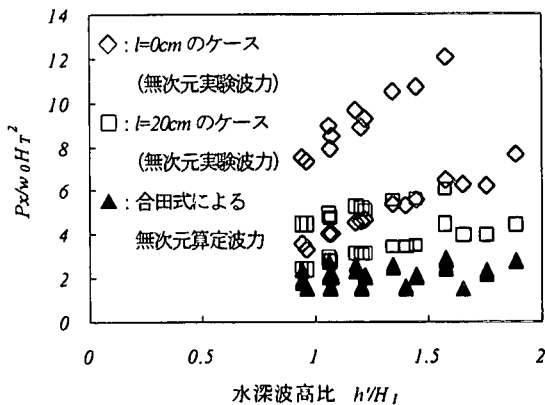


図-16 水深波高比と各無次元波力

る傾向が見られるが、 ϕ の変化はわずかである。

図-14より、相対遊水部幅 l/L の増加にともない ϕ は 0.64~0.44 に、 Φ は 0.89~0.49 に減少している。

f) 算定透過波高 H_T を用いた算定波圧と実験値との比較

著者らはすでに直立式ブロック積み堤を対象に透過率算定式を以下のように提案している。

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

$$f = 289(H_1/d')Re^{-0.5}$$

ここに、 σ : 角周波数、 B : 堤体幅、 ε : 空隙率、 Re : 長波の水平最大水粒子速度 (u) を用いた粒径レイノルズ数 ($=u \cdot d'/\nu$)、 g : 重力加速度、 h : 水深、 s : 慣性係数、 H_1 : 入射波高、 d' : ブロックの空隙代表径、 ν : 水の動粘性係数

これから式(1)に入射波条件ならびに堤体の構造条件を代入することで透過波高 H_T が求まる。(以後、算定透過波高と呼ぶ。)そしてこの算定透過波高 H_T を用い合田式により直立壁における算定波圧を推定する。

図-15と図-16は算定透過波高 H_T を用いた遊水部幅別の各無次元波圧 $[p_x/(w_0H_T)]$ 、ならびに同様の各無次元波力 $[P_x/(w_0H_T^2)]$ を縦軸にとり、横軸に入射波高による水深波高比 h'/H_1 をとったものである。これらの図より離岸距離が増加すると、無次元実験波圧ならびに波力の分布領域の幅は減少し、その平均値は離岸距離が大きくなるほど波圧、波力とも小さくなる。この結果、離岸距離の大きい場合は合田式による波圧、波力の算定値に近づくようである。

4. 結言

透過性構造物の消波性能を明らかにするための基礎研究の一環として、碎波も含む領域でのブロック積み直立消波工背面の直立壁に作用する波圧を対象に実験を行ない、その減勢効果を粒径レイノルズ数を視点に整理を行った。その結果、波圧の低減効果はブロックのスケールと入射波高の相対比とともに粒径レイノルズ数に大きく関係することが分かった。

参考文献

- 1) 榎木享・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) 榎木享・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) 榎木享・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.
- 5) 稲垣圭二・野口雄二・服部昌太郎：消波ブロック被覆工の波力低減率とその評価指標，第33回海岸工学講演会論文集，土木学会，pp362-366，1986.
- 6) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説改訂版(上巻)，469p，(社)日本港湾協会，1989.
- 7) 井田康夫・萩原照央・小鯛光彦：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，海洋開発論文集，土木学会，vol.14，pp333-338，1998.
- 8) 井田康夫・萩原照央・中村晋太郎・森松芳隆：消波工の波力低減特性に関するブロックスケールとレイノルズ数の効果，海洋開発論文集，土木学会，vol.15，pp369-374，1999.