

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

EFFECT OF BLOCK SCALE AND REYNOLDS NUMBER ON WAVE FORCE REDUCTION BY WAVE ABSORBING WORKS

井田康夫¹・萩原照央²・中村晋太郎³・森松芳隆³

Yasuo IDA, Teruo HAGIHARA, Shintaro NAKAMURA and Yoshitaka MORIMATU

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 大阪市旭区大宮 5-16-1)

²正会員 工修 東洋道路株式会社 (〒550-0004 大阪市西区靱本町 1-7-9)

³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 大阪市旭区大宮 5-16-1)

Effect of block scale and Reynolds number on model experiment of wave pressure in range of breaking wave was examined on an upright sea wall provided with wave absorbing works.

Wave pressure obtained decrease 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 .

The wave force at the upright seawall taken wave absorbing works is P and the wave force without a wave absorbing works is P_0 , in addition the ratio of P to P_0 is found between 0.12 and 0.92.

Key words : Wave pressure, upright seawall, wave absorbing works, block scale, Reynolds number

1. 緒言

近年の沿岸域利用の気運は比較的水深の浅い所だけではなく、大水深・高波浪の海象の厳しい領域までおよんでいる。そして建設される構造物は環境保全・景観・コスト縮減を視野にいれつつ、消波性能に力点を置いて計画され、その形態は構造物の目的に応じ多種多様である。このような消波機能を持つ構造物は護岸であれ、防波堤であれ構造物自体に空隙を内装しているか、あるいは消波ブロック被覆工のように構造物前方に空隙構造を外装している場合が多い。

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。

これらの消波構造体による波力の低減効果については、被覆工幅とブロック寸法の比に着目した稲垣らの研究⁵⁾があるものの、合田式の準用や森平式のように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う手法⁶⁾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圧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。

このため著者らは昨年度、直立消波工を持つ壁体を対象に、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、次の結果⁷⁾を得た。

①消波工がない場合と比べ、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、相対堤体幅の増大とともに減少する。

②相対遊水部幅が0または小さい領域では、消波工がない場合と比べ波圧の低減は顕著でなく、最高1.4倍程度

まで波圧が大きくなるケースもかなり認められた。

そこで本論文では対象を衝撃的碎波も含む領域に拡張し、消波工の波圧・波力低減効果を波高・空隙代表径比、粒径レイノルズ数および相対遊水部幅との関係において明らかにするとともに、合田式の準用や森平式による波圧・波力算定値と実験値との差異についても言及するものである。

2. 実験概要

(1) 実験装置と方法

実験装置は図-1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、高さ20cm、水平部幅60cm、斜面勾配1:3の不透過マウンドを設置し、この上に波圧計を中心部に埋め込んだ直立壁を構築したもので、これに所定の入射波を作用させて碎波時の波圧を測定した。波圧計の位置は $z=10, 5, 0, -5, -10\text{cm}$ の他、マウンド上水深(h')が25cmの場合は $z=15, -20$ 、そして $h'=30\text{cm}$ の場合は $z=-15\text{cm}, -25\text{cm}$ を加えた。最初に消波工のない状態で波圧を計測し、合田式や広井式による波圧分布と比較した。

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。そして消波工がない場合の実験波圧や低減率(λ)を考慮した合田式、森平式と対比し、最大波圧や波圧合力の低減効果を検討した。

なお入射波高および直立壁上の水位変動は容量式波高計で、そして波圧は容量100gf/cm(9.8kPa)の波圧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った。

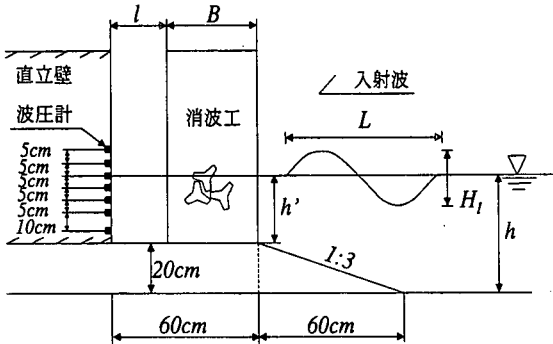


図-1 実験装置の概要

(2) 実験の種類

入射波はすべて碎波状態の規則波で、堤脚水深 h は45cmおよび50cm(マウンド上の水深 h' は25cmおよび30cm)とし、波高 $H_1=16.0\sim 22.0\text{cm}$ 、波長 $L=249\sim 405\text{cm}$ の範囲にある18種類である。堤体に使用したテトラポ

ッド模型は高さ $d=4.5\text{cm}$ (空隙代表径 $d'=2.9\text{cm}$)、 $d=7.2\text{cm}$ ($d'=4.6\text{cm}$)および $d=12.2\text{cm}$ ($d'=7.9\text{cm}$)の3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および20cmの3種類とした。実験の主要な指標は相対水深 h/L が0.116~0.181、波形勾配 H_1/L が0.045~0.080、水深波高比 h'/H_1 が1.248~1.563、波高・空隙代表径比 $H_1/d'=2.025\sim 7.572$ 、粒径レイノルズ数 $Re=11200\sim 44200$ 、相対堤体幅 $B/L=0.049\sim 0.161$ 、相対遊水部幅 $l/L=0\sim 0.080$ である。これらの詳細を表-1および表-2に示す。ここで、粒径レイノルズ数は $Re=u\cdot d'/\nu$ (u :水平最大水粒子速度、 ν :水の動粘性係数[0.01cm²/s])である。

表-1 入射波の諸元

ブロック高さ	$d(\text{cm})$	4.5, 7.2, 12.2
空隙代表径	$d'(\text{cm})$	2.9, 4.6, 7.9
堤体幅	$B(\text{cm})$	20, 40
遊水部幅	$l(\text{cm})$	0, 10, 20
波高・空隙代表径比	H_1/d'	2.025~7.572
粒径レイノルズ数	Re	11200~44200
相対堤体幅	B/L	0.049~0.161
相対遊水部幅	l/L	0~0.080

表-2 構造物の諸元

堤脚水深	$h(\text{cm})$	45, 50
マウンド上の水深	$h'(\text{cm})$	25, 30
波高	$H_1(\text{cm})$	16.0~22.0
周期	$T(\text{s})$	1.4~2.0
波長	$L(\text{cm})$	249~405
相対水深	h/L	0.116~0.181
波形勾配	H_1/L	0.045~0.080
水深波高比	h'/H_1	1.248~1.563
波の個数		18

3. 実験結果と考察

以下の記述において最大波圧および波力を次の様に表記する。消波工がない場合の直立壁の作用波圧について、実験値に添字0をつけて、最大波圧を pm_0 、これを含む波圧合力を P_0 とし、合田式および広井式による最大波圧および波圧合力の算定値をそれぞれ $p_{G0}, P_{G0}; p_{H0}, P_{H0}$ で表すものとする。そして消波工を設置した場合の実験値は最大波圧を pm 、波圧合力を P とする。また合田式の準用(低減率 $\lambda=0.8$)および森平式による算定値をそれぞれ $p_G, P_G; p_M, P_M$ で表すものとする。なお、波圧合力は最大波圧時の同時波力とした。

(1) 消波工がない場合の波圧特性

a) 波圧分布

図-2 は実験波ごとの波圧分布の例で、実験波圧(◆)と算定波圧、すなわち合田式(×)、広井式(□)による値を示している。算定波圧の計算に際し、合田式中の波高は規則波の入射波高(H_i)をそのまま用い、また広井式による波圧の作用高は静水面上 $1.25 H_i$ としている。

これらの図によると実験波圧は静水面 ($z=0$) 付近で大きな波圧を示し、顕著な碎波型の波圧分布を呈している。これに対し、合田式による分布は $z=5\text{cm}$ 付近より上部は実験値より大きな波圧となっているが、これより下部は実験波圧に比べ、かなり小さい。一方、広井式による分布においては、静水面上は実験波圧よりかなり大きい、最大波圧および静水面下の波圧は実験値にかなり近い値となっている。

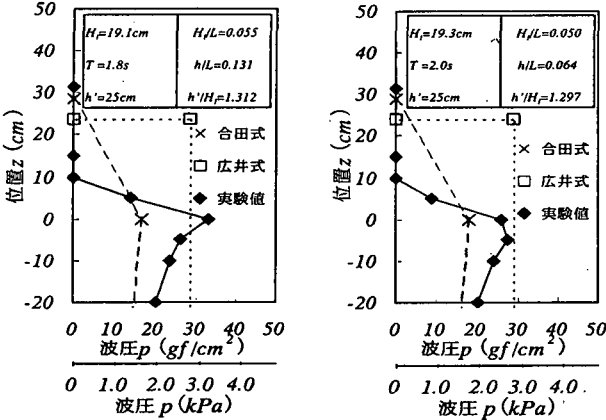


図-2 波圧分布(消波工なし)

b) 最大波圧比ならびに波力比と水深波高比の関係

合田式ならびに広井式による算定値と実験値を比較するため最大波圧比 (p_{G0}/p_{m0} , p_{H0}/p_{m0}) と水深波高比 (h'/H_i) の関係を示したものが図-3 である。この図から最大波圧比は合田式で $0.40 \sim 0.84$ 、広井式で $0.75 \sim 1.43$ の範囲にある。同様に波力比 (P_{G0}/P_0 , P_{H0}/P_0) については図-4 より、合田式で $0.63 \sim 1.13$ 、広井式で $1.56 \sim 2.45$ の範囲にある。これらの結果から $h'/H_i = 1.248 \sim 1.563$ の碎波の実験範囲においては合田式による最大波圧は実験波圧より小さく、広井式による波力は実験波力よりかなり大きいことが分かる。

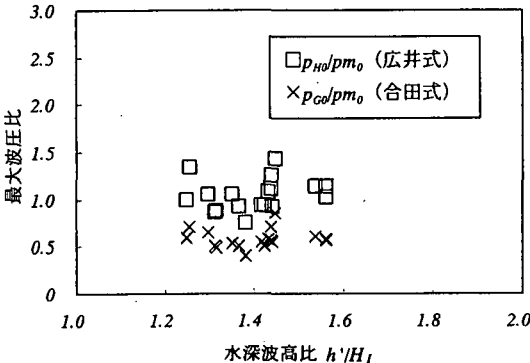


図-3 最大波圧比と水深波高比の関係

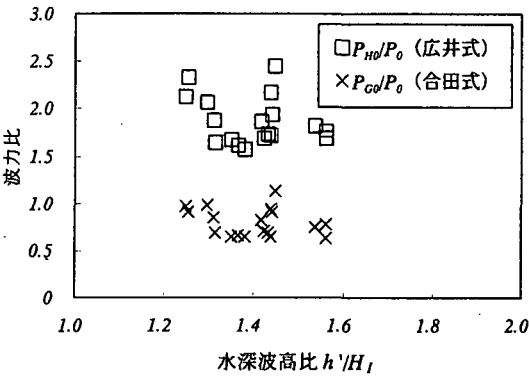


図-4 波力比と水深波高比の関係

c) 最大波圧比ならびに波力比と無次元波圧・波力との関係

合田式ならびに広井式による算定値と実験値の最大波圧比 (p_{G0}/p_{m0} , p_{H0}/p_{m0}) と、波高相当の静水圧を用いた無次元波圧 ϕ ($p_{m0}/w_0 H_i$ [w_0 : 水の単位重量]) の関係を図-5 に、そして同様に波力比 (P_{G0}/P_0 , P_{H0}/P_0) と無次元波力 Φ ($P_0/w_0 H_i^2$) の関係を図-6 に示す。これらの図において、無次元波圧が 1.05 から 2.00 に増加するのにもとない、最大波圧比は合田式で 0.85 から 0.41 に、広井式で 1.43 から 0.75 に単調に減少する。そして波力比も無次元波力の 1.62 から 2.52 への増加とともに合田式で 1.13 から 0.63 に、広井式で 2.45 から 1.56 に減少する。

以上碎波時の波圧・波力について実験値と、合田式、広井式による算定値との比較を試みたが、実験断面ならびに適用条件の違いもあり、実験値に対し、合田式は最大波圧が過小に、広井式は波力が過大に表れている。

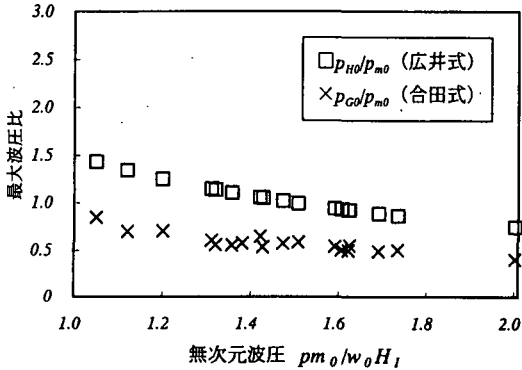


図-5 最大波圧比と無次元波圧

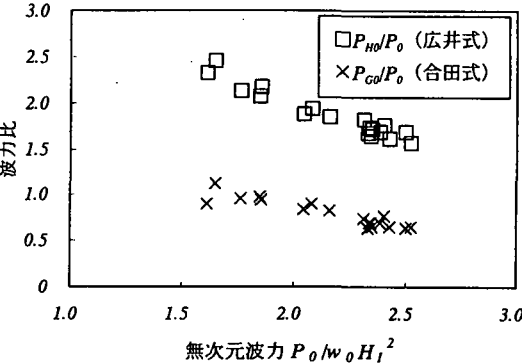


図-6 波力比と無次元波力の関係

(2) 消波工がある場合の波圧低減特性

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')、堤体幅(B)および遊水部幅(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-7~図-9を作成した。これらの図において、空隙代表径が小さいほど、また堤体幅が大きいほど、そして遊水部幅が大きいほど作用波圧は明らかに小さくなっている。これを消波工がない場合と比較すると各位置において全般に波圧は小さくなっているに加えて、静水面付近の最大波圧が著しく減少し、水底に向かって波圧の均等化が認められる。

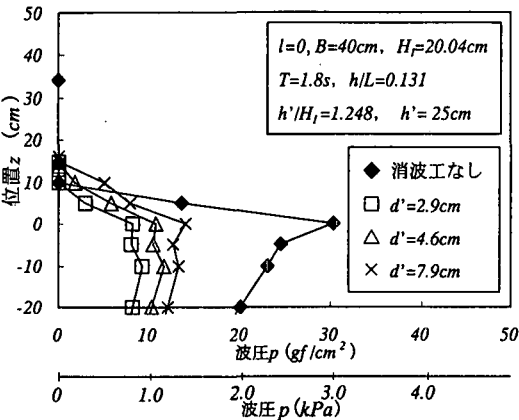


図-7 波圧分布(空隙代表径の差)

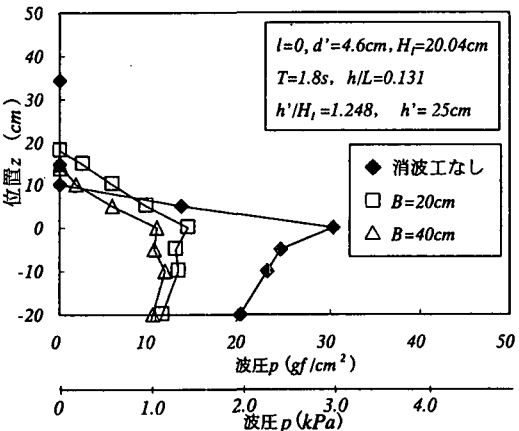


図-8 波圧分布(堤体幅の差)

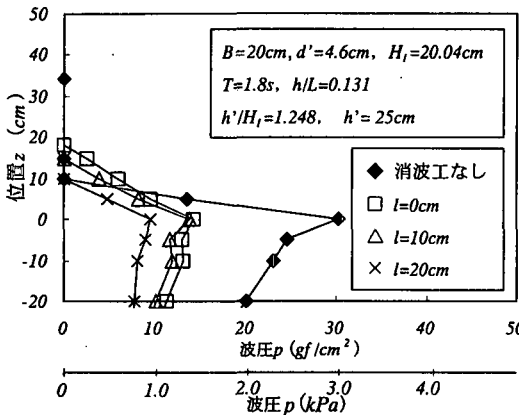


図-9 波圧分布(遊水部幅の差)

b) 実験波圧と算定波圧の比較

一般に消波ブロックで充分被覆された直立壁に碎波的な波が作用する場合の波圧は、被覆されていない場合に比べかなり緩和される。この場合の作用波圧の算定には合田式の準用(低減率 $\lambda=0.8$ の導入)または森平式が用いられる。図-10はこのような算定波圧と実験波圧を比較したもので、図中の算定波圧は入射波が同じであるため両図は等しい。この図より $B=20\text{cm}$ の実験波圧は森平式(Δ)より小さく、合田式($\times$)の準用値に近い分布を示している。しかし $B=40\text{cm}$ になると実験値はさらに小さくなる。両図の比較から実験値は堤体幅が大きいほど、また空隙代表径が小さいほど算定波圧より小さくなる。このことは消波工による波圧の低減は波高・空隙代表径比や粒径レイノルズ数に係わる事項であることを示している。

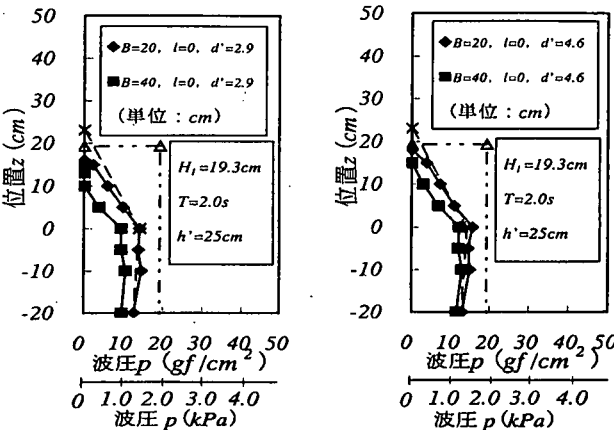


図-10 実験波圧と算定波圧

合田式の準用や森平式による算定値と実験値の比 p_G/p_m , p_M/p_m , P_G/P , P_M/P についてまとめたものが表-3である。表は単純に数値の範囲のみを示したものであるが全体的に実験値は合田式の準用値に近いことが分かる。

表-3 最大波圧比と波力比の比較

最大波圧比	p_G/p_m	0.72~2.70
	p_M/p_m	1.03~4.24
波力比	P_G/P	0.79~4.18
	P_M/P	1.37~8.77

c) 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、消波工が無い場合の実験値(p_{m0} , P_0)の比で表すこととする。

最大波圧低減率 $m = p_m/p_{m0}$

波力低減率 $M = P/P_0$

この m , M は消波工の有無による無次元最大波圧ならびに無次元波力の比、 ϕ/ϕ_0 , Φ/Φ_0 にも相当する。

そこでこのような低減率と、波高・空隙代表径比、粒

径レイノルズ数および相対堤体幅の関係を見ることとし、その例を図-11～図-13に示す。これらの図はすべて遊水部が無い場合である。

図-11より、 $m=0.31\sim0.52$ 、 $M=0.25\sim0.50$ の範囲にあり、消波工による最大波圧、波力の低減効果が大きく認められる。またこれらの低減率は波高・空隙代表径比の増大にともなって減少している。そしてこれらの傾向は他の実験条件の場合でも同様に見られる。

図-12より、 $m=0.40\sim0.47$ 、 $M=0.50\sim0.54$ の範囲にあり、消波工による波圧・波力の低減効果は大きい、粒径レイノルズ数の範囲が狭く、この増大にともなう低減率の減少傾向がわずかに認められる程度である。

図-13より、 $m=0.47\sim0.65$ 、 $M=0.40\sim0.85$ の範囲にあり、相対堤体幅の増加とともに減少している。

次に相対遊水部幅が最大波圧、波力の低減率におよぼす影響についてまとめたものを図-14に示す。同図より l/L の増加にともない m は 0.52 から 0.33 に、また M は 0.69 から 0.31 に大きく減少している。このことは施工その他の問題点はあるが、単に波圧の低減率のみを考えれば、遊水部が有効に機能していることを示している。

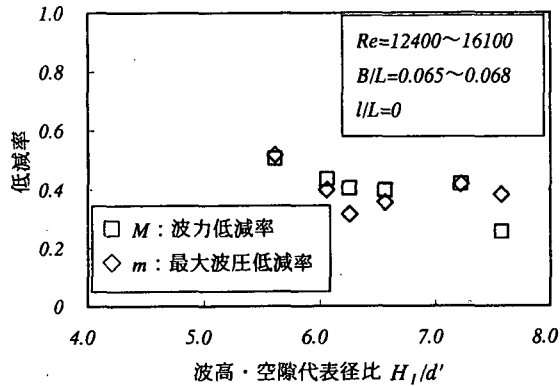


図-11 低減率と波高・空隙代表径比の関係

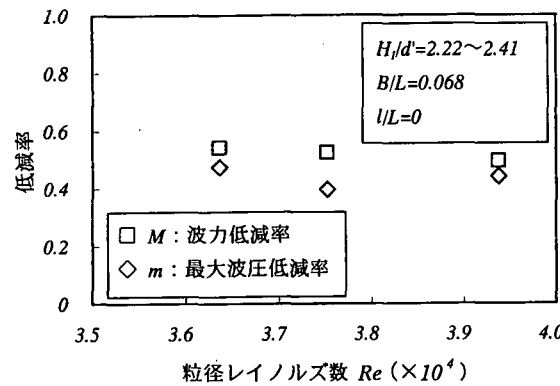


図-12 低減率と粒径レイノルズ数の関係

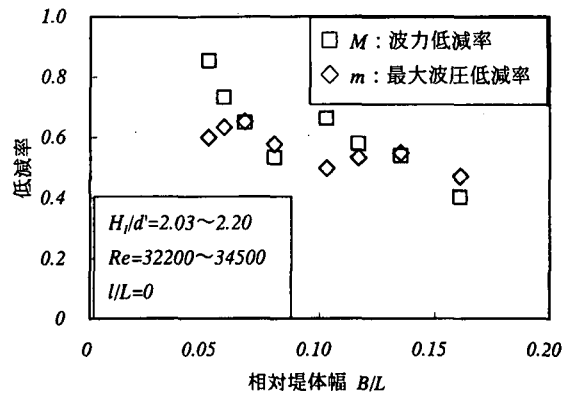


図-13 低減率と相対堤体幅の関係

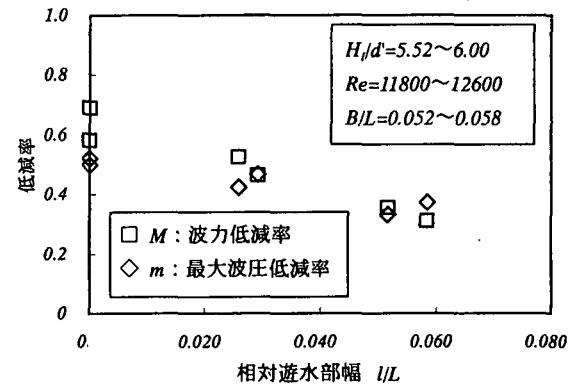


図-14 低減率と相対遊水部幅の関係

d) 碎波と重複波の波圧低減率の比較

消波工の有無にかかわらず直立壁部の水深と入射波高の比で波動の形態は大きく異なる。そして一般的には消波工による波圧の低減は重複波領域ではあまり小さくなく、碎波時の方が顕著である。そこで波力低減率について昨年著者らが行なった重複波領域における実験の結果と、今回の碎波領域の実験結果と比較する。

図-15によれば波高・空隙代表径比の増大にともなう重複波、碎波とも波力低減率は減少しているが、両者の低減率には大きな差があり、碎波の場合の低減効果は著しい。また図-16を見ると、 Re の領域に大きな差があるが、重複波、碎波のそれぞれの低減率はその分布範囲が判然と分れており、碎波の低減効果はかなり大きいことが分かる。

次に無次元波圧および無次元波力、そして最大波圧および波力の低減率についてその分布範囲を総括し、これを表-4に示す。この表から ϕ 、 Φ 、 m 、 M はいずれも重複波よりも碎波の方が小さい値を示していることが分かる。

このように重複波と碎波では波圧低減効果に大きな差が認められる。

表-4 重複波と碎波の比較

記号	重複波	碎波
ϕ	0.27~1.51	0.24~0.97
Φ	0.79~14.27	0.26~1.78
m	0.22~1.57	0.15~0.78
M	0.21~1.70	0.12~0.92

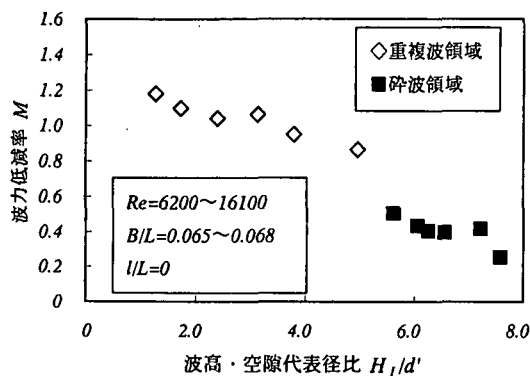


図-15 波圧低減率の比較

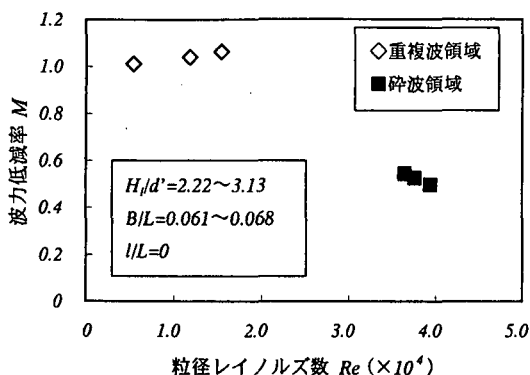


図-16 波圧低減率の比較

4. 結言

透過性構造物の消波性能に関する基礎研究の一環として、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、碎波領域において入射波や構造物の特性と波圧低減効果について実験的研究を行った。そして既報の重複波領域の結果とも合わせて検討し次の結果を得た。

- ①波圧は消波工がない場合に比べ全体に減少するが水面付近の最大波圧は特に小さくなる。この結果、波圧分布は水面から水底にわたり均等化される傾向にある。
- ②入射波が同じ場合、空隙代表径が小さいほど、また堤体幅が大きいほど、そして遊水部が大きいほど作用波圧は小さくなる。
- ③合田式の準用や森平式による算定波圧より最大波圧や波力の実験値はともになんかなり小さい。
- ④消波工による波圧の低減率は最大波圧で 0.15~0.78、波力で 0.12~0.92 程度となる。
- ⑤無次元最大波圧は 0.24~0.97、無次元波力は 0.26~1.78 程度となる。
- ⑥相対遊水部幅の増大にともない、波圧・波力は大きく減少し、単純に波圧の低減だけを考えれば遊水部の効果は極めて大きい。
- ⑦重複波の波圧・波力の低減率はあまり大きくなく、低減率が 1.0 を超える場合もかなり多い。しかし碎波の場合は消波工の効果で低減率は 0.15~0.78 程度に減少する。

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)，(社)日本港湾協会，469p.，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。

(1999. 4. 19 受付)