

ブロック被覆工による波高減衰と作用波力の特性について

Effect of Wave Attenuation of Modeled Armor Blocks and Wave Force on Them

小野正順*・出口一郎*・榎木 亨*

Masanobu. Ono, Ichiro. Deguchi and Toru. Sawaragi

Submerged breakwaters, one of the coastal protection works, are usually constructed by rubble stones of relatively small size and armor blocks which cover rubble stone. In order to discuss the stability of submerged breakwaters and the effect of submerged breakwater on wave attenuation, function of armor blocks for controlling fluid motion and wave force on them have to be fully analyzed.

In this paper, we simplify the armor blocks on the crown of the submerged breakwater by using flat plate with openings. Flow pattern around opening, energy loss on the plate and wave force on the plate are investigated through experiments

Keywords: Armor block on submerged breakwater, Wave force on armor block,

1. はじめに

近年、海岸保全対策工法の一つとして用いられてきている幅広潜堤は、通常比較的重量の小さい捨石などを中詰めとし、その表面を重量の重い被覆工ブロックで被覆する構造で建設される。従って、来襲波による被災を防ぐためには、まず被覆工ブロックの安定性について検討する必要がある。また、波浪制御効果についても幅広潜堤が、透水性の異なる潜堤構成材料と被覆工ブロックで構成されていることから、従来研究されているような一様な透水層で構成された潜堤による波浪制御効果だけではなく、その表面の被覆工ブロックによる波浪制御効果についても考慮する必要がある。そのためには、被覆工下側の流体に、どの程度波動運動が伝播されているのかを明らかにしておく必要がある。

本研究では、このような被覆工を、空隙を有する水平板に置き換えることにより、その透水性による波高減衰効果、被覆工ブロック周辺の流速分布、及びブロックに作用する波力について実験的に明らかにすると共に、大型構造物に対して適用性が確認されているポテンシャル理論に基づくGreen関数法を用いて数値計算を行い、各特性量に対する非ポテンシャル的な流体運動による影響を明確に示した。

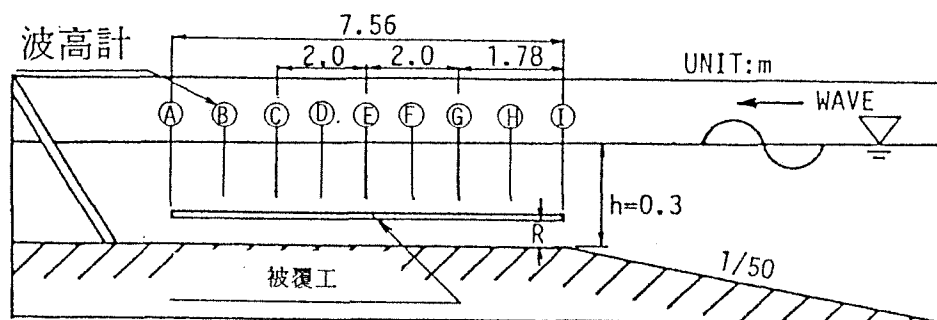


図-1 被覆工と波高計の設置状況

2. 実験装置及び実験方法

実験水槽は、図-1に示す長さ30m、幅0.5m、高さ1.2mの2次元造波水槽を用いた。空隙を有する被覆工のモデルは、水平板でモデル化され長さ $B=7.56\text{m}$ 、幅0.5m、厚さ1.2cmの防水ベニヤに半径 $r=2.7\text{cm}$ の円形の空隙を設けて作成し、造波機から約21mの所に水平に設置した。被覆工の空隙の形状及び配置は、図-2に示す3種類とし、空隙率 α は7.2, 14.4, 28.8%である。水深 h は30cm、入射波周期 T は1.1secとし、被覆工設置位置 R を5, 10, 15cmの3種類、波形勾配を0.01~0.05の3種類に変化させ、いずれも非砕波の条件で実験を行った。この波条件で、被覆工は入射波

* 正会員 大阪大学工学部土木工学科(〒565 吹田市山田丘2-1)

波長に対して十分大きい長さ ($B/L=4.6$) を有し、入射波波長に対して十分小さい空隙径 r ($r/L=0.017$) で空隙が空けられている。被覆工上での波高減衰を測定するため、被覆工上のほぼ $0.9m$ 間隔の 9 地点 (図中 A ~ I 地点) で波高の測定を行った。流速は、被覆工中央部 (E 地点) の空隙部において、鉛直方向に被覆工から上下 $0.5cm$ 離れたところから $1cm$ 間隔に 6 地点、さらにそこから $2cm$ 間隔に測定できる範囲の水平・鉛直流速を測定した。被覆工ブロックに作用する揚力は、被覆工中央部 (E 地点) における被覆工を一部切り取り、そのセグメントに作用する揚力を片持ち梁形式の波力計により測定した。一方、被覆工ブロックを緩傾斜護岸として用いる場合を想定して、護岸としての波の通過あるいは反射特性について実験を行った。この場合、被覆工の法面勾配としては、現地で施工されている緩傾斜護岸の法面勾配 $1/3 \sim 1/6$ 程度を考慮して、 $1/3, 1/6, 1/10$ の 3 種類に変化させた。護岸の反射率の測定は反射波側に設置した 2 本の波高計のデータから入反射波分離法を用いて測定した。

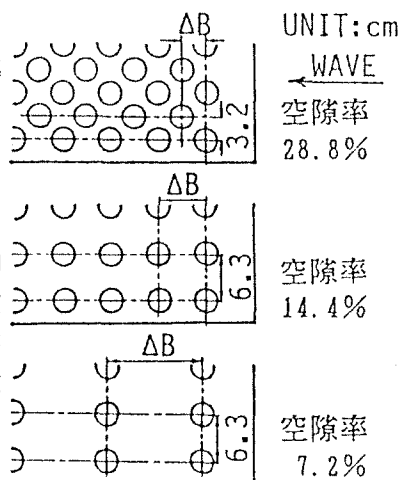


図-2 被覆工ブロックの模型
(空隙径 $r = 2.7cm$)

3. ポテンシャル理論に基づく解析法

ポテンシャル理論に基づく解析法としては、薄肉物体にも適用できる 2 次元 Green 関数法¹⁾を用いた。解析に用いた被覆工の鉛直 2 次元解析モデルは、図-3 に示すように空隙の間隔 ΔB を模型と等しくとり、実験模型と解析モデルの空隙率が等しくなるように解析モデルにおける空隙幅 D を決定した。

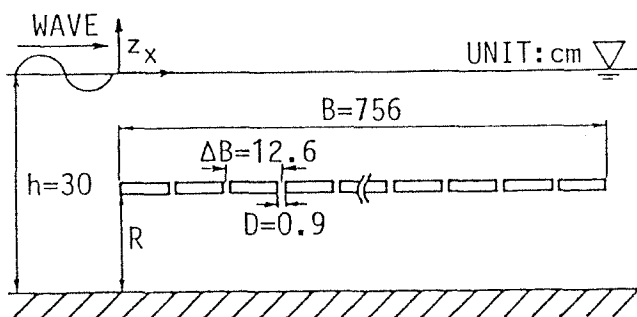


図-3 被覆工の 2 次元解析モデル (空隙率 7.2%)

4. 被覆工による波浪制御効果と作用波力の特

4. 1 被覆工天端上の波高減衰特性

図-4 と 5 は、測定波高を入射波波高で除した無次元波高を回折係数 K_D と定義し、被覆工の設置位置が $R/h=0.167$ と $R/h=0.5$ の場合における被覆工天端上の波高分布を回折係数 K_D の分布として示したものである。図 (a), (b) は各々被覆工の空隙率が $\alpha = 7.2\%$, 28.8% の場合を示し、各図中の 3 種類の記号 $\square, \triangle, \circ$ は、それぞれ入射波の波形勾配 H_1/L が $0.01, 0.03, 0.05$ の場合を示す。各図より被覆工の設置水深に関係なく波形勾配が大きいくほど波高の減衰が大きく、その特性は設置水深が大きく、空隙率が小さい程明確に現れる。これは、エネルギー逸散を生じると考えられる空隙が、水粒子速度のより大きい水面近くに位置するため、波高が大きく波形勾配が大きい場合に波高減衰が大きいのも同様な理由である。また、被覆工の空隙の数が少ない (空隙率が小さい) 場合空隙での縮流効果によって大きなエネルギー逸散を生じ、空隙の数を増やす (空隙率を大きくする) と空隙での縮流効果があまり激しくなくエネルギー逸散は小さくなるものと考えられる。よって、空隙率の小さい場合の波高減衰は、入射波波高の影響を受け易いものと考えられる。従って、被覆工天端上の波高減衰は、各ケースとも波高の大きい沖側部分で急激に減少し、岸側部分では減衰が小さ

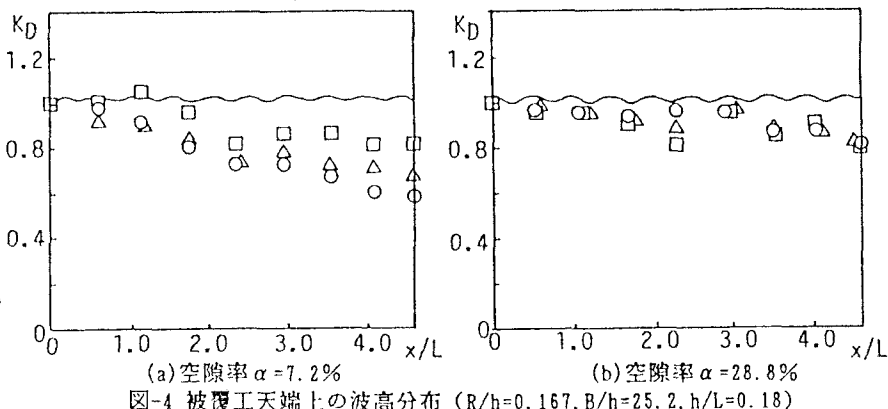


図-4 被覆工天端上の波高分布 ($R/h=0.167, B/h=25.2, h/L=0.18$)

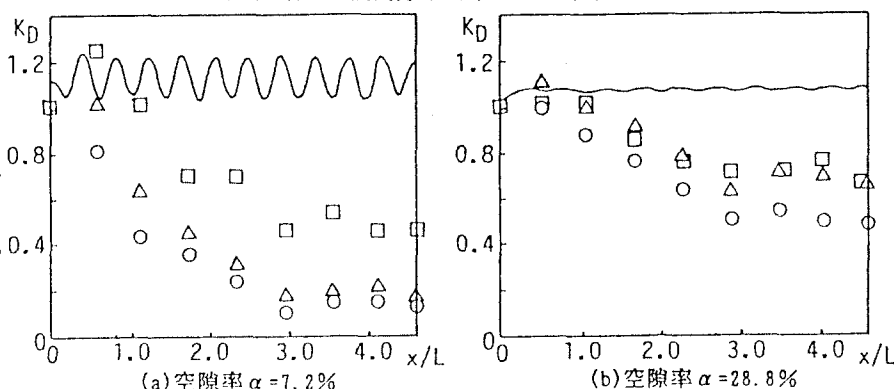


図-5 被覆工天端上の波高分布 ($R/h=0.5, B/h=25.2, h/L=0.18$)

さい程明確に現れる。これは、エネルギー逸散を生じると考えられる空隙が、水粒子速度のより大きい水面近くに位置するため、波高が大きく波形勾配が大きい場合に波高減衰が大きいのも同様な理由である。また、被覆工の空隙の数が少ない (空隙率が小さい) 場合空隙での縮流効果によって大きなエネルギー逸散を生じ、空隙の数を増やす (空隙率を大きくする) と空隙での縮流効果があまり激しくなくエネルギー逸散は小さくなるものと考えられる。よって、空隙率の小さい場合の波高減衰は、入射波波高の影響を受け易いものと考えられる。従って、被覆工天端上の波高減衰は、各ケースとも波高の大きい沖側部分で急激に減少し、岸側部分では減衰が小さ

い。特に、 $R/h=0.5$ の場合は、空隙率に関わらず沖側から波長の3倍程度までは波高減衰が大きく、その後の岸側部分では、ほとんど波高は減衰せず K_0 の値も重複波程度にばらつきを生じる。一方、Green関数法による算定結果は、入射波と回

折波との重ね合わせにより被覆工の天端上で重複波を形成するためピーク状の波高分布となる。

実験結果においては、十分な測定点が無いためこれらの波高分布が生じているかどうかはわからないが、重複波程度の K_0 のばらつきが波高の減衰した岸側付近でみられ、おそらく波高の減衰に重複波の波高分布が重なっていると考えられる。従って、実験では回折波による波変形より、非ポテンシャル的エネルギー逸散が卓越していることがわかる。また、円形の空隙形状を同じ空隙率を有する正方形の空隙形状でモデル化し、3次元形状を考慮できるGreen関数法²⁾を用いて解析した算定結果は、上述した2次元解析モデルとほぼ同様な算定結果であったことを付記しておく。図-6と7は、それぞれ被覆工の設置位置が $R/h=0.167$, $R/h=0.5$ の場合における被覆工の空隙率 α を変化させた場合のエネルギー逸散率 E_L の変動特性を示す。エネルギー逸散を算定するに当たり、反射率は0と仮定している。図より被覆工の設置位置に関係なく空隙率が小さいほど波高減衰が大きく、エネルギー逸散を生じると考えられる空隙の個数を増やしても必ずしも波高減衰は大きくならないことがわかる。しかし、空隙がなければ波高減衰は被覆工の表面抵抗によるもののみでほとんどないと考えられることから、エネルギー逸散が最大となる空隙率が存在し、その値は本研究で対象としている被覆工に対して10%程度であることがわかる。これは非常に小さな値であり、被覆工に空隙があることによってその天端上を伝播する波は急激に減衰を生じることがわかる。

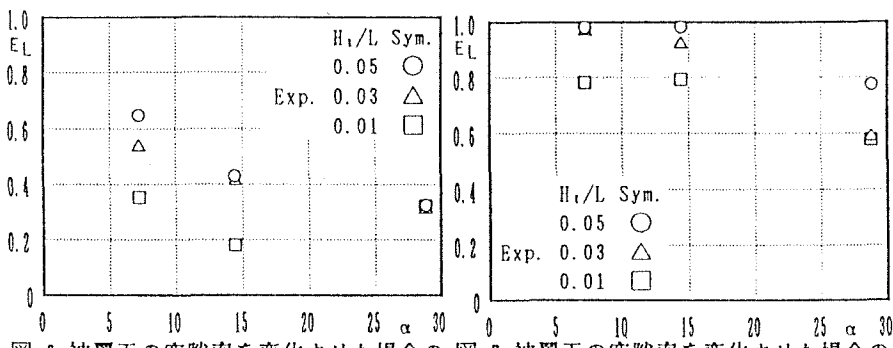


図-6 被覆工の空隙率を変化させた場合のエネルギー逸散率 E_L の変動特性 ($R/h=0.167$, $B/h=25.2$, $h/L=0.18$)

図-7 被覆工の空隙率を変化させた場合のエネルギー逸散率 E_L の変動特性 ($R/h=0.5$, $B/h=25.2$, $h/L=0.18$)

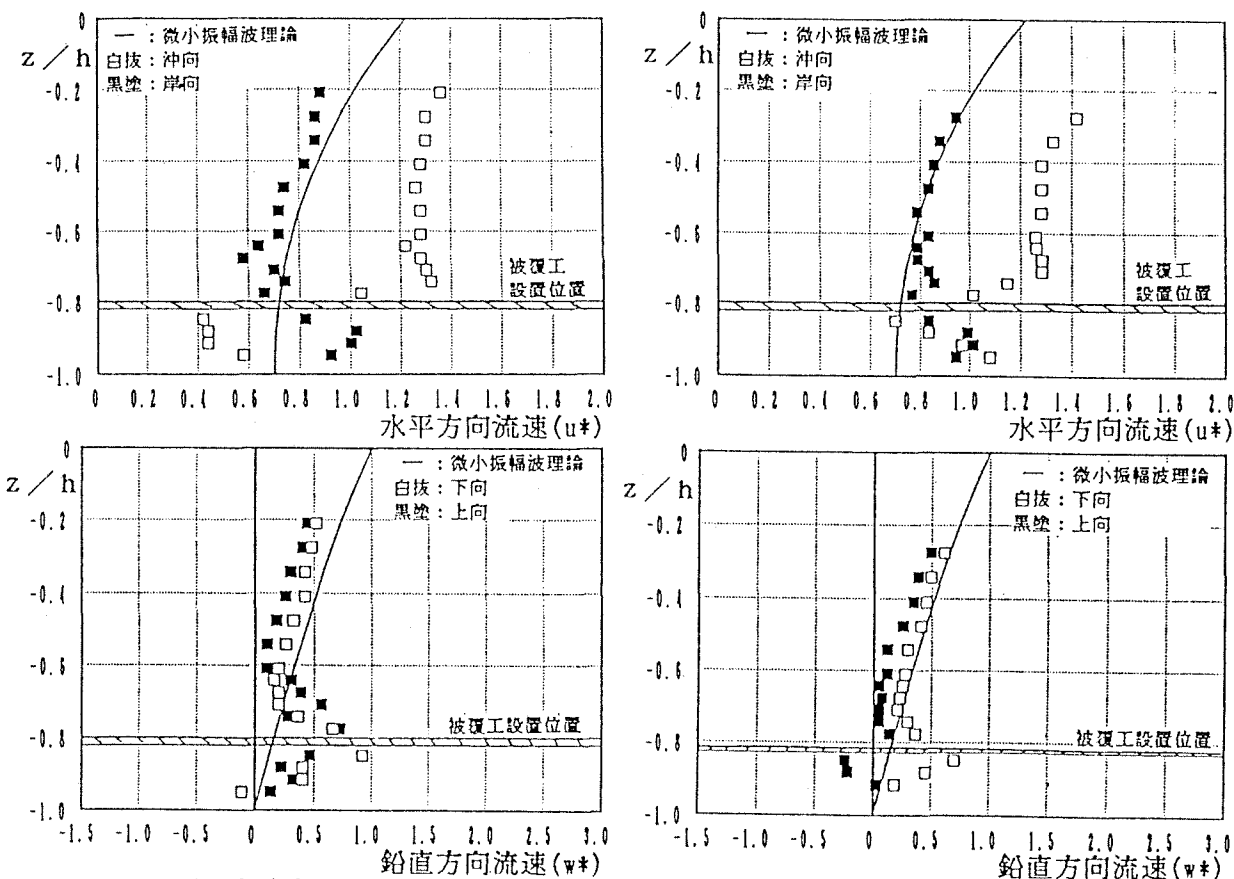


図-8 被覆工周辺の流速分布 ($H_1/L=0.01$, $R/h=0.167$, $B/h=25.2$, $h/L=0.18$, $h/L=0.03$)

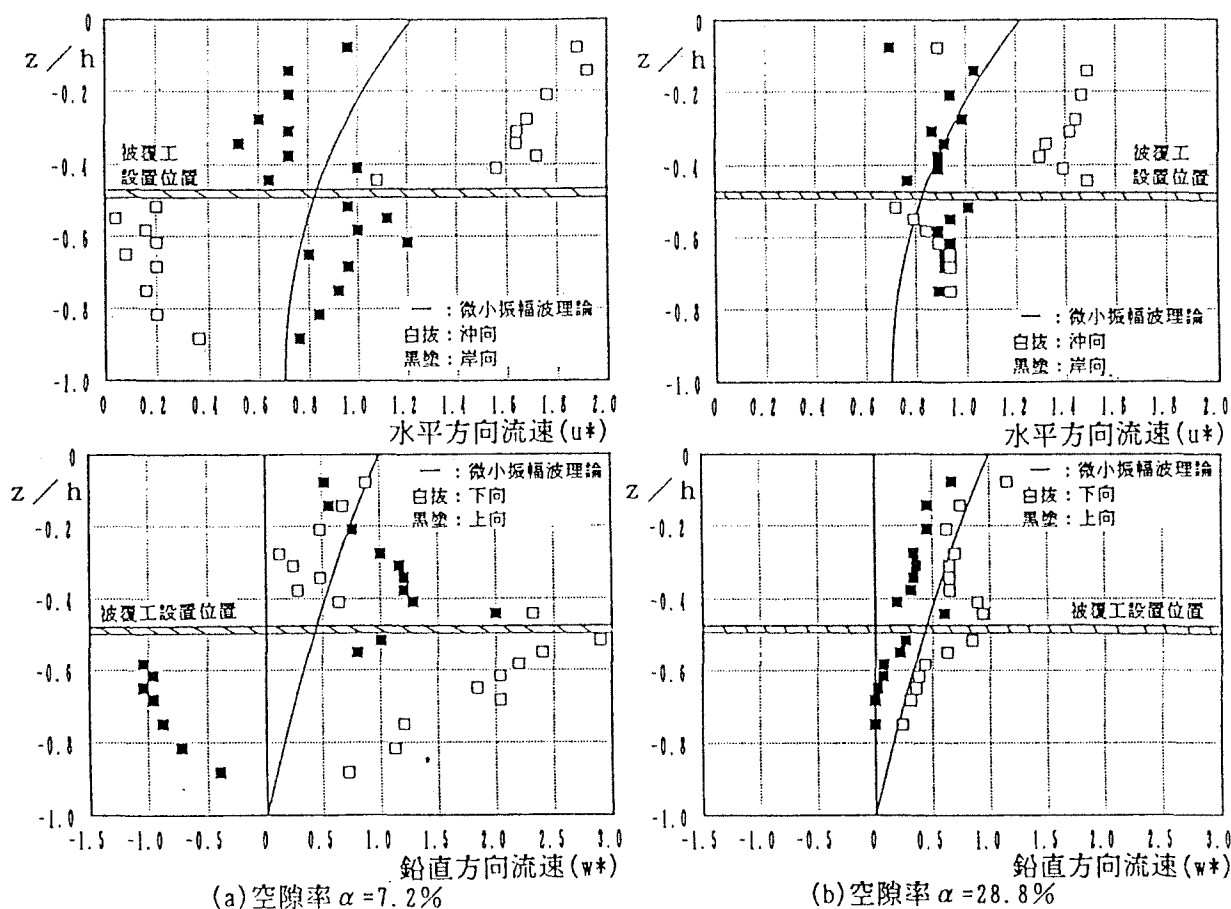


図-9 被覆工周辺の流速分布 ($H_1/L=0.01, R/h=0.5, B/h=25.2, h/L=0.18, h/L=0.03$)

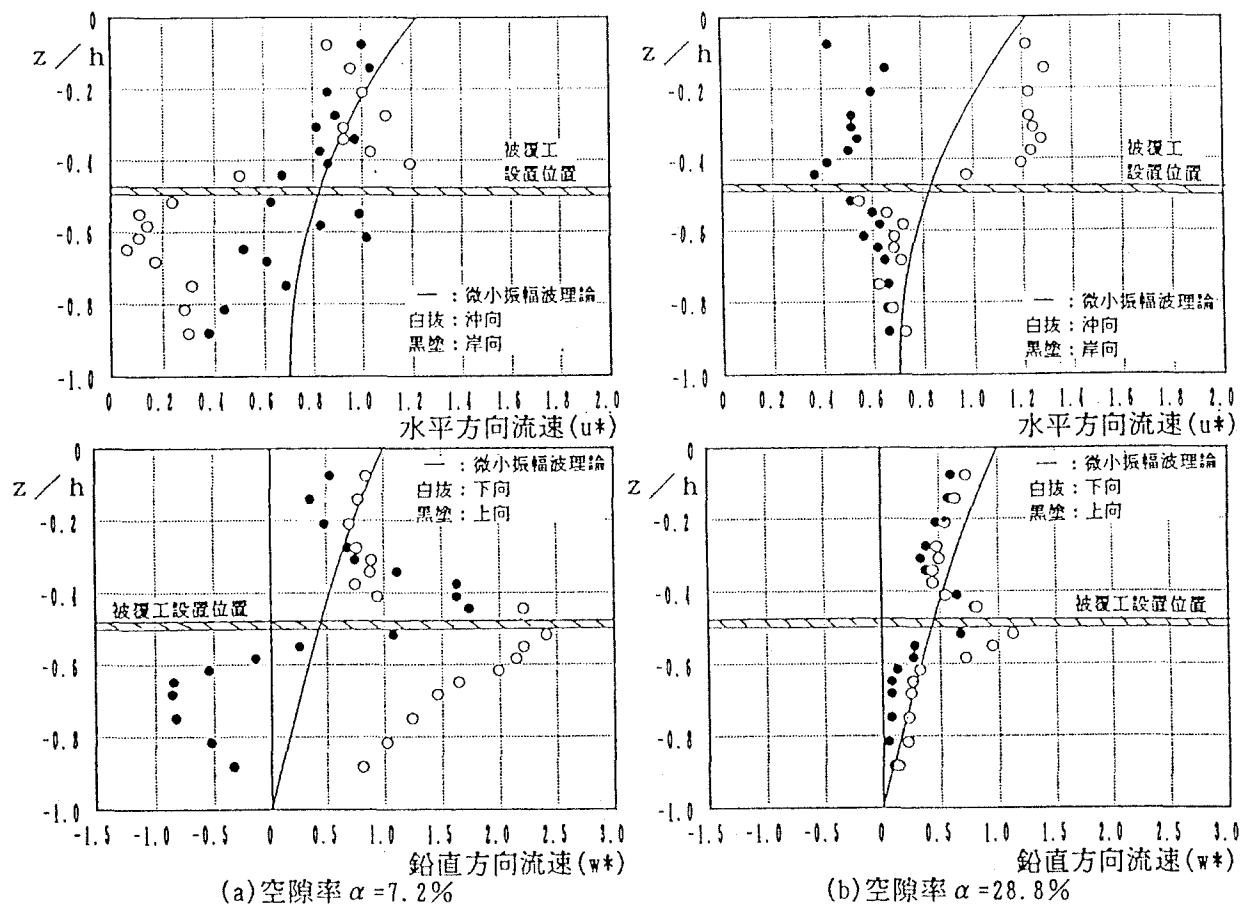


図-10 被覆工周辺の流速分布 ($H_1/L=0.05, R/h=0.5, B/h=25.2, h/L=0.18, h/L=0.03$)

4. 2 被覆工周辺の流速分布の特性

図-8と9は、 $H_1/L=0.01$ で各々被覆工の設置水深が $R/h=0.167, 0.5$ の場合における図-1中のE地点の鉛直方向に14~17点で測定した流速振幅の鉛直分布を示す。図(a), (b)は、被覆工の空隙率が7.2, 28.8%の場合を示す。各上図が水平方向流速、下図が鉛直方向流速を示し、水平方向流速については、図中の記号で白抜が冲向、黒塗が岸向流速を各々示し、鉛直方向流速については、白抜が下向、黒塗が上向流速振幅を示す。なお、図中には、被覆工を設置しない場合の微小振幅波理論によって求められる解も併せ示している。各流速は、測定地点E点での波高 H_E を用いて次式の無次元流速で表示している。

$$(u^*, w^*) = (u, w) / (\sigma H_E / 2) \quad (1)$$

各図の水平方向流速の冲向方向流速の増加は、波の有限振幅性の効果であると考えられる。入射波あるいは被覆工天端上の波の相対水深(h/L_1)は、0.18, 0.09程度であり、比較的波の峰がとがった谷の平坦な波である。図-8の設置水深が小さい場合、空隙率の小さい方が被覆工周辺の鉛直流速が多少大きくなっているが、空隙率の変化に伴う水平・鉛直流速振幅の空間分布の変化はあまり明確には現れていない。図-9の設置水深が大きい場合も、空隙率の大きい場合は被覆工周辺で鉛直流速振幅の多少の増大がみられるがその増幅される範囲や増大量はあまり大きくなく、空隙における縮流効果は明確に生じてはいない。しかしながら、空隙率が小さい場合、特に被覆工下側で大きい鉛直下向きの流速が測定されている。この条件で被覆工周辺の流速は、被覆工により5~6倍程度に加速され、その範囲は被覆工内部から天端上水深の中ごろまで及ぶ。この特性は、図-9と同様な条件で $H_1/L=0.05$ の場合の図-10についても同様に見られる。そして、空隙率の大きい場合についても、被覆工周辺の鉛直方向流速振幅は、波形勾配が小さい場合と比較すると大きくなっている。この被覆工周辺の鉛直流速振幅の増大により空隙周囲には剥離渦が生じていることが容易に想像できる。これらの乱れによって天端上を伝播する波は減衰させられると考えられ、これは空隙率7.2%でエネルギー逸散が極大値となることで裏付けている。

4. 3 被覆ブロックに作用する波力の特性

被覆工中央部の被覆ブロックに作用する揚力は、被覆工中央部の波力セグメントに作用する揚力として測定され、そこで測定された波高 H_E を用いた次式の無次元波力 $\bar{F}^*$ で表示する。

$$\bar{F}^* = \frac{\bar{F}}{\rho g \frac{H_E}{2} S_1 S_2 (1-\alpha)} \quad (2)$$

上式で、 S_1, S_2 は波力セグメントの縦横の長さを示す。

図-11は、空隙率 $\alpha=14.4\%$ の被覆工を設置水深 $R/h=0.5$ で設置した場合の被覆工中央部のブロックに作用する揚力の kh による変動特性を示したものである。作用させた波の波形勾配は、0.03~0.05程度の波を作用させた。図中の白抜の記号で示される実験結果は上向波力を、黒塗は下向波力を表す。本論文で対象としている波条件($T=1.1\text{sec}$)は、 $kh=1.15$ である。図中には、ポテンシャル理論から求められる被覆ブロックに作用する慣性力(鉛直方向波力)についても併せて示している。図より、本研究で対象としている波条件に対して被覆ブロックに作用している揚力は、抗力より慣性力が卓越している領域であることがわかる。そして、本波条件より長周期波側では抗力による波力が慣性力による波力を上回り、予測される慣性力以上の波力が作用する可能性がある。図-12は、被覆工設置位置が $R/h=0.333$ の場合において被覆工の空隙率を変化させた場合の被覆ブロックに作用する揚力の変動特性を示す。図より、空隙率が小さくても波形勾配が小さければ、ほとんど慣性力によって作用波力が予測できることがわかる。比較的大きい抗力が作用するのは、設置水深 $R/h=0.333$ の場合で空隙率が小さくかつ波形勾配の大きい場合であり、かなり激し

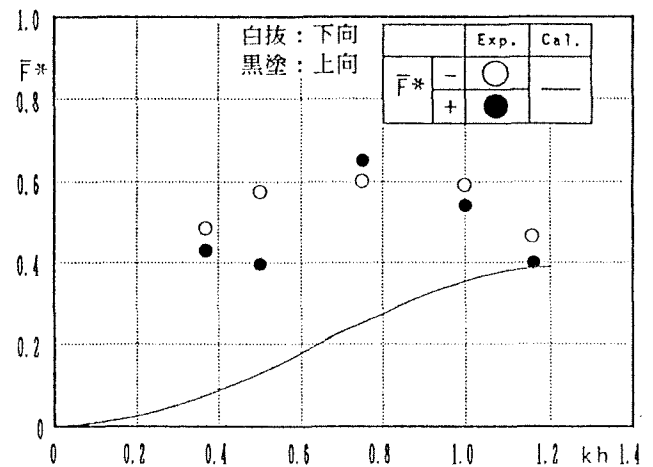


図-11 被覆工中央部のブロックに作用する揚力の入射波周期による変動特性
($\alpha=14.4\%$, $R/h=0.5$, $B/h=25.2$)

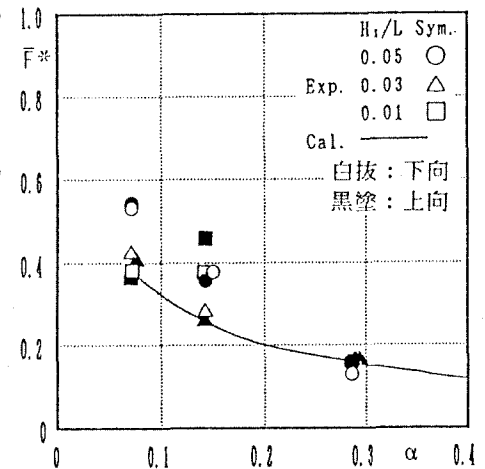


図-12 被覆工の空隙率を変化させた場合の被覆ブロックに作用する揚力の変動特性
($R/h=0.333$, $B/h=25.2$, $h/L=0.18$)

い波浪条件でないと慣性力を上回る大きな抗力は作用しないと考えられる。さらに、被覆工設置位置が $R/h=0.5$ についての結果は、図-13に示される。図-9や10の流速振幅の空間分布で被覆工の空隙の縮流効果により激しく乱された空隙率の小さい場合において、慣性力の1.5~2.0倍程度の抗力が作用する。空隙率の大きい場合は、波形勾配を大きくしても設置位置を高くしても慣性力以上の抗力が作用せず、図-9や10で示される程度の被覆工周辺の縮流では、慣性力を上回る抗力は生じないことがわかる。

以上のことから、被覆工ブロックの安定性について考えると、波高減衰が大きく、慣性力を上回る抗力が作用するような条件の場合（被覆工の空隙率が小さく設置水深が大きい）に対しては、波高の減衰効果は期待できるが、慣性力を上回る抗力の増加により被覆工には、非常に大きな揚力が作用し、被覆工の本来の目的である潜堤構成材料の散乱防止のために安定性を考慮すると不経済な被覆工ブロックとなる。従って、被覆工に消波機能を期待せず、空隙を設けても被覆機能に支障がなければ、空隙を設けることによりあまり大きな抗力も作用せず経済的な被覆工が設計できる。また波高減衰の方法としては、被覆工内部に流体運動が伝達するため潜堤構成材料の透水性を利用して波高減衰させる方法や、天端上で強制砕波させるなどの方法を用いる方が、より合理的な被覆工ブロックの利用方法であると考えられる。

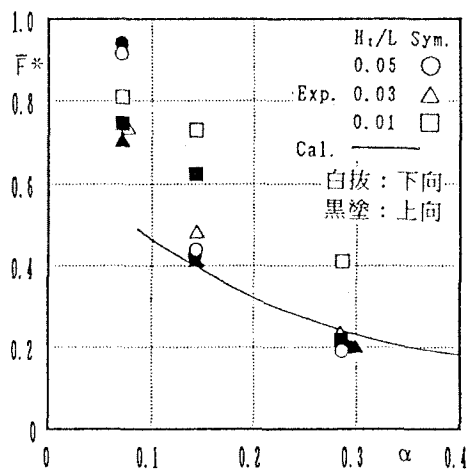


図-13 被覆工の空隙率を変化させた場合の被覆ブロックに作用する揚力の変動特性 ($R/h=0.5$, $B/h=25.2$, $h/L=0.18$)

5. 結語

- i) 入射波波長に対して十分大きい長さを有し、入射波波長に対して十分小さい空隙が設けられている被覆工上の波高減衰は、被覆工の設置位置が波動運動の激しい水面に近く、波形勾配が大きいほど波高減衰（エネルギー逸散率）が大きい。
- ii) 水深の真ん中に設置された被覆工上を伝播する波は、沖側からはほぼ入射波波長の3倍程度の領域で減衰が大きく、それより岸側はほとんど減衰せずに伝播する。
- iii) 入射波波長に対して十分大きい長さを有し、入射波波長に対して十分小さい空隙が設けられている被覆工上の波高減衰率が最大となる空隙率は、5~10%程度である。
- iv) 被覆工周辺での鉛直流速振幅は、波高減衰があまり大きくない場合でも被覆工の縮流効果によって加速される。そして、空隙率が小さく被覆工設置位置が水面に近い場合、被覆工の縮流効果によって鉛直流速は、より広範囲でより大きく加速され、この流速に伴う抗力の仕事で波動はエネルギーを逸散し、波高減衰を生じるものと考えられる。
- v) 被覆工ブロックに作用する波力は、被覆工の設置位置が水面から離れている場合でも、空隙率が小さく波形勾配が大きければブロックに慣性力以上の抗力が作用する場合がある。逆に被覆工の空隙率が大きい場合（30%以上）ブロックには慣性力以上の抗力はほとんど生じない。
- vi) 法面上に設置した被覆工による反射率は、被覆工の法面勾配や空隙率に関係なくほぼ0.2以下に抑えることができる。しかしながら、被覆工の空隙率が大きい場合、透過する波動はかなり大きくなるため被覆工背後での波動の制御を考慮する必要がある。

<参考文献>

- 1) 中村孝幸・薄肉物体まわりの波浪境界値問題に関する解析法, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 410-414, 1983.
- 2) 中村孝幸・野村周吾・規則配列された3次元物体まわりの波浪境界値問題の解析法, 第37回海岸工学論文集, pp. 524-528, 1990.