

に示すような片持ちばり形式のモーメント変換型波力計を用いて測定した。波力計の本体は、一辺15mmの鋼製角棒の各辺の中心線上に半導体ひずみゲージを貼付けたもので、ゲージ位置でのモーメントを検出して、自由端側に作用する外力を測定するものである。実験では、この波力計の自由端側に、図中に示すように3個のブロックを取りつけ、これら3個のブロックに作用する水平および鉛直波力（あるいは直交する波力2成分）を同時に測定した。波力計は計3台使用して、図-1、4の模型リーフ上の斜線で示す位置で、被覆ブロックに作用する波力を測定した。なお、ひずみゲージの貼付けてある波力計本体には波が作用しないように、3分した水路の中央部に設けた波力計設置用空間内にその本体を格納した。このブロックを取り付けた波力計の水中での固有振動数は、25Hz程度であり、作用する波の周波数に比較すると十分に高く、動的な影響を無視して波力測定が行えるものと考えられる。

d) 流速計および波高計：被覆ブロックに作用する波力と流体場との関係を検討するため、図-4に示す波力測定位置の近傍の2カ所に、岩田ら⁴⁾により紹介されている針流速計を設置して、法面に平行方向の流速および水平流速を測定した。また、波力と流速の測定結果と水面変動との関係についても検討できるように、図中に示すリーフ上の3カ所で容量式波高計により水面変動も測定した。一方、入射波の測定用水路内にも、堤体の真横の位置に容量式波高計1台を設置して、リーフよりの反射波の影響などを受けない正確な入射波が測定できるようにした。

(2) 実験方法

実験では、図-4に模式的に示すように、測点A、B、Cのそれぞれで直交する波力2成分、リーフ面に平行な流速、水面変動の3者を同時に測定した。また、リーフ上での砕波状況についても、ビデオカメラで撮影して、観測した。また、本実験ではリーフ背後の透過波や、リーフよりの反射波についても測定しているが、その詳細については割愛したい。

模型リーフに作用せしめた波条件は、周期 $T=1.0\sim 2.0\text{sec}$ の範囲の6種類、波高 $H=6, 12, 15\text{cm}$ の3種類（造波時点て砕波する場合を除く）である。このとき模型の設置水深 $h=35\text{cm}$ 、天端上水深 $R=7.5\text{cm}$ と一定にした。

2. 2 ブロックの遮蔽効果および流体力係数に関する実験

この実験は、人工リーフ上の被覆ブロックのように配列されたブロックにおける波力の低減効果、すなわち遮蔽効果を検討するために行った。この際、ブロックの抗力係数や慣性係数についても解析できるように配列ブロック上の水面変動なども測定した。

波力測定に用いたブロックは、2. 1で述べた被覆ブロックと同じで、波力計も図-3に示すもので、これを水底近傍に平行に設置した。そしてリーフ天端上のブロックのように8個連ねたものを単位として、これを3列分のみ配列したときの、中央列に位置するブロックに作用する水平および鉛直波力を測定した。ブロックの横方向の配列間隔 e は、リーフ模型と同じ3mmに、また水底とブロック底面との間隔は8mmに固定した。そして、ブロック列の前後間隔（波向き方向の間隔）は、外縁距離で3mmと2.5cmの2種類を用いた。また、前後間隔が無限大に相当する単列の場合についても実験を行った。作用せしめた入射波の条件は、上記した人工リーフ実験の場合とほぼ同じで、設置水深 h についても同じ35cmとした。

3. 配列ブロックの遮蔽効果と流体力係数

3. 1 極大波力の低減効果

図-5は、3列配置とした場合の中央列のブロックに作用する極大水平波力 F_{H3} と単列のそれ F_{H1} の比の周期に関する無次元量 h/L （水深波長比 L ：波長）による変化を示す。この図より、水平波力は、3列配置にすると、単列に比較して $e=3\text{mm}$ の場合3～4割程度、 $e=2.5\text{cm}$ の場合2～3割程度減少することが認められる。図中には、ブロックと同じ外郭寸法をもつ直方体を、実験と同じ条件で配列したときの波浪ポテンシャル理論による算定結果も併せ示してある。なお、この理論算定は、同一物体の規則的配列を想定したグリーン関数法⁵⁾に基づくものである。これらの理論算定結果と実験結果を比較すると、 h/L の大きな短周期側で両者は概略的に一致していることが認められる。

本研究では、鉛直波力についても水平波力と同様な検討を行っているが、鉛直波力の極大値は水平波力の1/2程度と小さいことや水平波力に比較すると配列による波力低減効果が弱いことなどを確認している。

3. 2 抗力と慣性力

水底付近に置かれた小型物体に作用する波力は、一般にモリソン式で算定される。ここでは、微小振幅波理論が適用できるものとしてモリソン式に基づき、配列ブロックに作用する水平および鉛直波力のそ

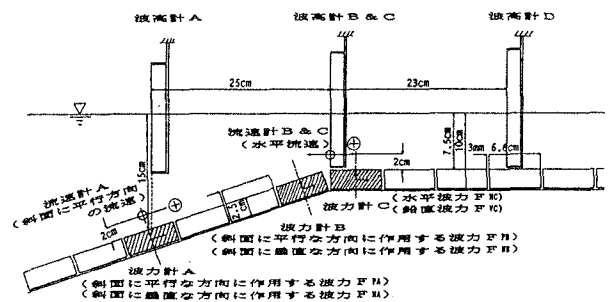


図-4 波力計、流速計および波高計の設置位置

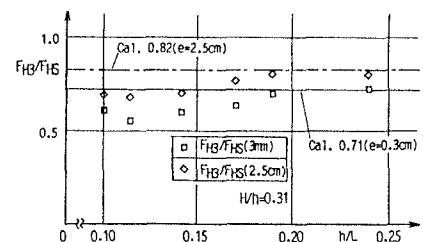


図-5 配列による極大水平波力の低減率

れぞれを抗力と慣性力に分離解析してみた。図-6 (a), (b)は、水平波力を対象にして、分離解析した抗力および慣性力のピーク波力に占める割合を水深波長比による変化で示す。ここで (a), (b) 図は、それぞれ単列および $e=3\text{mm}$ とした3列の場合の結果を示す。これらの図より、単列の場合、抗力と慣性力はほぼ同程度の割合であるのに対して、3列配置にすると抗力の割合が減少して、慣性力が卓越しやすくなることが認められる。この原因としては、配列間隔が小さくなると、ブロック背後に渦流れが形成されにくくなり、抗力が減少することによるものと考えられる。

図-7 (a), (b)は、図-6 (a), (b)に対応する水平方向の

抗力係数 C_D 、慣性係数 C_M を示す。ここで、ブロックの体積 V および射影面積 A には、それぞれブロックの実体積($=64\text{cm}^3$)およびこの体積をもとにして計算される代表長 $D(=4\text{cm})$ を用いて $A=D^2$ で与えられる値を適用した。なお、これらの図の横軸には、底面での水平流速を用いて求められる $K-C$ 数(Keulegan-Carpenter数)が採っている。この図より、 C_D 、 C_M の両者共に単列の場合が最大で、3列配置にすると、これら係数は減少することが認められる。そして、この減少度合は、慣性係数よりも抗力係数の方が顕著であることがわかる。また、慣性係数は、 $K-C$ 数による変化がほとんど見られないのに対して、抗力係数は、 $K-C$ 数が大きくなると減少するなどの特性も認められる。

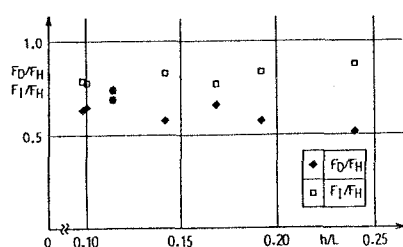
4. リーフ上の被覆ブロックに作用する波力

4. 1 波力時間波形

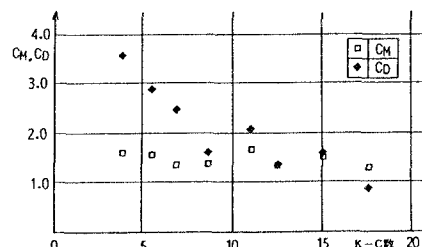
図-8, 9は、それぞれマウンド構造が透過性および不透過性の場合について、被覆ブロックに作用する波力の2成分、ブロック上の流速、水面変動などの時間波形の代表例を示す。各図で測定波力としては、図-4に示す測点B, Cでの結果が、一方流速、水面変動としては測点B, Cの中心に相当する法肩位置で測定した結果が示してある。なお、このときの波条件は、実験の範囲内で最も長周期で、最大波高のものになっている。また図中には、流体加速度の時間波形についても併せ示してあるが、これは測定した流速の数値時間微分により算出したもので、いわゆる局所加速度に相当する。さらに図中には、各測定時間波形の位相関係がわかるように、流速が正のピークを示す時間位相を実線で、流体加速度がそれを示す時間位相を点線でそれぞれ示してある。

ここで、各図での流速、加速度、波力2成分の表示には、以下の記号が用いてある。 $\eta_{B\&C}$, $u_{B\&C}$, $A_{B\&C}$: それぞれ法肩での水面変動、水平流速および加速度。 F_{PB} , F_{NB} : 測点Bでの平行方向波力および垂直波力。 F_{HA} , F_{VA} : 測点Cでの水平、鉛直波力である。

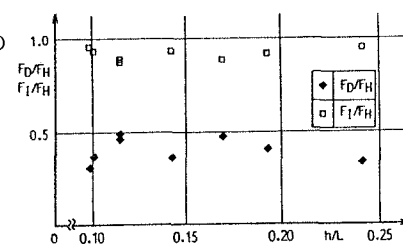
まず、各図の1, 2段に示す水面変動と流速の時間波形に着目すると、多少位相差の見られる場合もあるが、ほぼ両者のピークは同時刻に現れることや波形も相似関係に近いことなど、両者の間には強い相関関係のあるこ



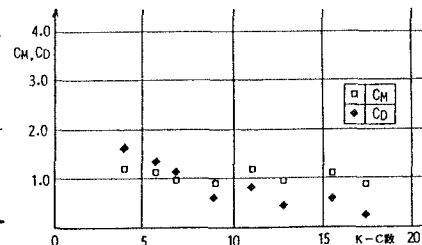
(a) 単列の場合



(a) 単列の場合



(b) 3列の場合 ($e=3\text{mm}$)



(b) 3列の場合 ($e=3\text{mm}$)

図-6 抗力と慣性力の大きさ

$T=2.0\text{sec}$, $H=16.2\text{cm}$

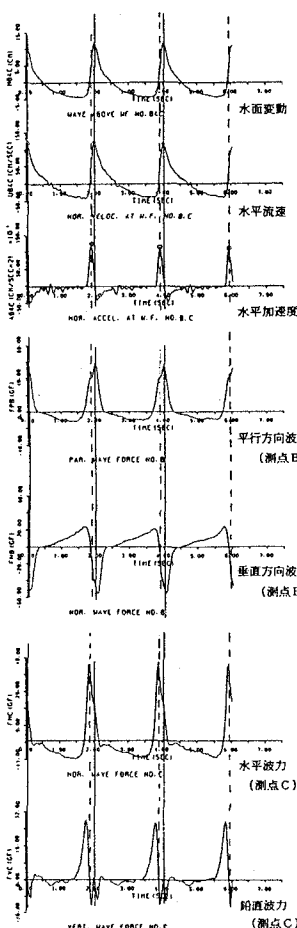


図-8 時間波形
(透過性マウンド)

$T=2.0\text{sec}$, $H=18.3\text{cm}$

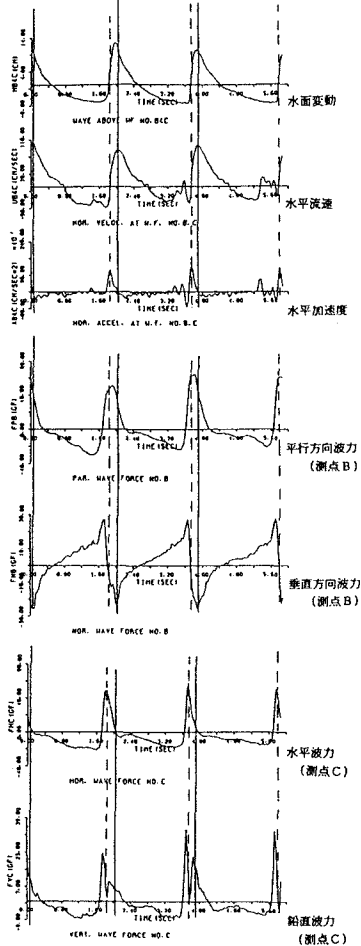


図-9 時間波形
(不透過性マウンド)

とが認められる。

a) 測点Bでの波力: 最初に法面上に位置する測点Bに着目すると、平行方向の波力 F_P がほぼ流速波形に類似しており、垂直波力 F_N は流速波形の正負を逆転したような波形に近くなっていることが認められる。これは、測点Bにおいて、被覆ブロックが法面の角度だけ傾斜して設置されていることから、波峰がブロック上方を通過するとき、波力2成分のベクトル方向はほぼ水平か、多少下向きになることによるものと考えられる。そして、ブロックに作用する波力ベクトルは、結果的に正值の F_P として、また負値の F_N として検出されることになる。事実、測点Bでは、 F_N が負のピークを示す位相は、実線で示す流速の正のピークの位相にほぼ一致していることが認められる。そして、 F_P と流速および加速度との位相関係に着目すると、 F_P と流速のピークはほぼ一致している。しかし、このように F_P がピークを示す位相で、 F_N は上記したようにブロックを法面に押し付けるように作用しており、ブロックの移動という観点から考えると、波峰通過時における法面上の被覆ブロックは比較的安定なものと推定される。

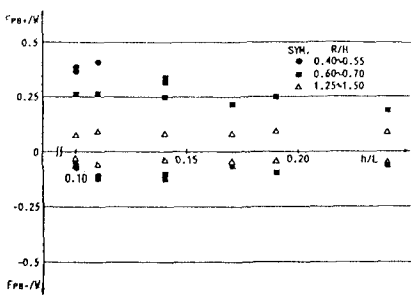
b) 測点Cでの波力: ブロックが天端の先端にある測点Cでの波力に着目すると、水平波力 F_{HC} のピークは、ほぼ水平加速度のそれとほぼ一致している。また、鉛直波力 F_{VC} は、水平加速度の時間波形と類似していることも認められる。そして、 F_{HC} と F_{VC} の正のピークが現れる位相は、上記した法面上の測点Bの場合に比較してかなり近接しており、天端上の方がブロックの移動を考える上で重要になるものと推測される。このように、法面上と天端上では、被覆ブロックに作用する波力の時間波形の特性が大きく異なるが、これは主にブロックの設置角度の相違により生じるものと考えられる。すなわち、法面上に設置されたブロックは、あたかも流れに傾斜して固定されたときのような状態に、また天端上のブロックは、流れに平行に固定されたときのような状態にそれぞれあり、流れとの干渉効果の相違が結果的に作用波力に現れたものと言えよう。

c) マウンド構造による差異: 図-8, 9の波力波形を比較すると、最も大きな相違は、測点Bでの垂直方向波力に見られる。特にこの垂直波力の負のピーク値は、マウンド構造を不透過性とすることにより、その絶対値が顕著に減少している。しかしながら、平行方向波力や水平波力については、マウンド構造の影響をあまり受けて、両堤体で相違はあまり見られない。これらのことより、マウンド構造は、垂直波力や鉛直波力に強く影響するものと言えよう。

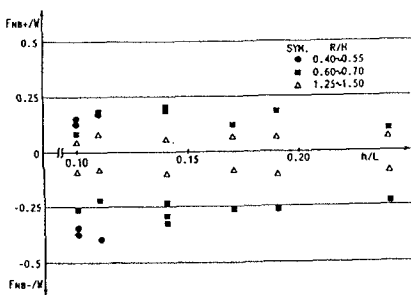
4. 2 極大波力の特性

図-10, 11は、透過性マウンドの場合の測点B, Cにおける正負のピーク波力の水深波長比(h/L)および R/H (R : 天端上水深) による変化を示すもので、図中ではピーク波力を被覆ブロックの空中重量 $W(=144gf)$ で除した無次元波力で表示してある。また、各図の(a), (b)は、それぞれ平行波力(あるいは水平波力)および垂直波力(あるいは鉛直波力)をそれぞれ示す。これら図より、平行波力(あるいは水平波力)および垂直波力(あるいは鉛直波力)の両者は、浅水比 h/L にあまり関係せず、入射波高すなわち R/H により主に変化することがわかる。そして、平行波力(あるいは水平波力)の正のピーク値は、移動に関係する R/H の小さな条件下では、測点Bにおいて最大で W の4~5割程度になっている。また、この波力の負のピーク値は、正のピーク値の1/5~1/3の大きさで、移動波力という観点からはあまり重要でないことがわかる。

一方、垂直波力(あるいは鉛直波力)の正のピーク値は、同様の条件下で、測点BとCで同程度になっている。

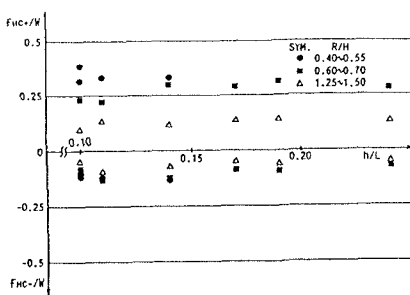


(a) 平行方向波力

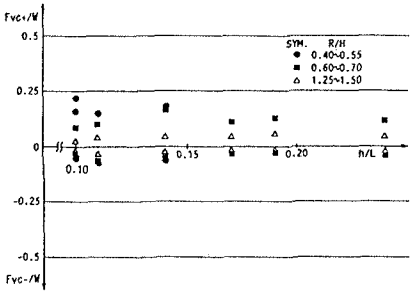


(b) 垂直波力

図-10 測点Bでの極大波力 (透過性マウンド)

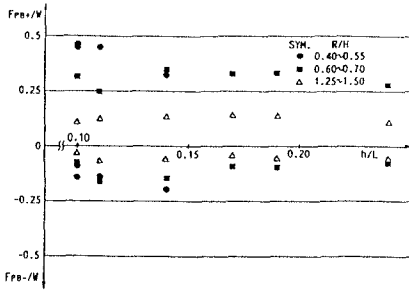


(a) 水平波力

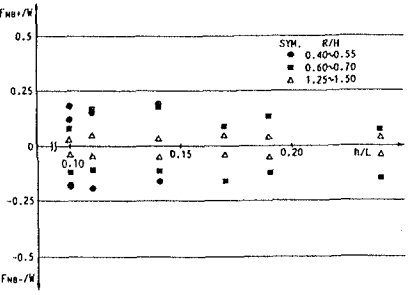


(b) 鉛直波力

図-11 測点Cでの極大波力 (透過性マウンド)



(a) 平行方向波力



(b) 垂直波力

図-12 測点Bでの極大波力 (不透過性マウンド)

また、負のピーク値は、法面上の測点Bの方が、天端上の測点Cよりも大きいことが認められる。ここで、特筆すべきことは、4. 1で一部述べたように、法面上における垂直波力の負のピークの大きさで、平行波力の正のピークと同程度の大きさにもなることである。そしてこの事実と、4. 1で述べた法面上の平行波力の正ピークと垂直波力の負ピークの出現位相が一致することを考え併せると、上記した測点Bで正の平行波力が最大になるという結果は、ブロックの移動という観点からは重要でなく、むしろ天端上の測点Cの方が注目すべき場所と言えよう。

次に図-12は、不透過性マウンドの場合の測点Bにおけるピーク波力を示す。この図と透過性マウンドの場合の対応する結果(図-10)とを比較すると、大きな差異は、測点Bにおける垂直波力の負のピークの大きさにあり、不透過性マウンドとすることにより、この負のピーク値はほぼ1/2にも減少することが認められる。したがって、ブロックの移動実験を不透過性マウンドを用いて行くと、特に法面上におけるブロックの移動限界を過小評価することになるものと言えよう。

4. 3 流体場と波力の関係

ここでは、比較的大きな波力であることが確認された測点B、Cの平行波力(or 水平波力)について、流速および加速度との関係について検討してみた。これらの結果の代表例を示すのが図-13、14で、それぞれ測点B、Cの平行波力(or 水平波力)と流速および加速度との関係を、両対数グラフ上にプロットして調べたものである。これらの図より、測点Bの平行波力の正のピーク F_{PB+} は、ほぼ水平流速の正のピーク値 u_{B8c+} の2乗に比例する流体力に、一方測点Cの水平波力の正のピーク F_{HC+} は、水平加速度に比例する流体力であることがわかる。そして、これらの測点での垂直波力(or 鉛直波力)についても同様の検討を行ったが、やはり測点Bでは流速の2乗に比例する波力、測点Cでは加速度に比例する波力であることなどが確認されている。

4. 4 被覆ブロックの流体力係数

(1) 抗力と慣性力の卓越度

ここでは、上記までの検討により、測定した水平流速やそれに基づき算定した加速度との位相関係が明確な平行波力(あるいは水平波力)に着目して、3. の配列ブロックのときと同様にモリソン式を適用して抗力および慣性力に分離解析してみた。なお、分離解析の対象にした波力は、透過性マウンドの場合で、しかも絶対値の大きな正方向波力のみとした。

この結果の代表例を測点BとCについて示すのが、図-15、16である。これらの図より、法面上の測点Bでは、水深波長比 h/L の小さな長周期側では抗力の方が、その大きな短周期側では慣性力の方が卓越する傾向が認められる。一方、天端上の測点Cでは、ほぼ慣性力が卓越する結果になっている。そして、浅水比および R/H の両者が小さくなるような長周期大波高の条件になると、抗力の占める割合も上昇するが、慣性力を越えるまでには到っていない。このように、法面上と天端上では、測点BとCのように場所的に隣接する場合でも、作用波力の特性に大きな相違が見られる。これは、上記したように、ブロックの傾斜角度に起因するものと考えられる。

(2) 抗力係数および慣性係数

図-17は、それぞれ上記で分離解析した抗力および慣性力から求めた被覆ブロックの抗力係数 C_D および慣性係数 C_H のK-C数

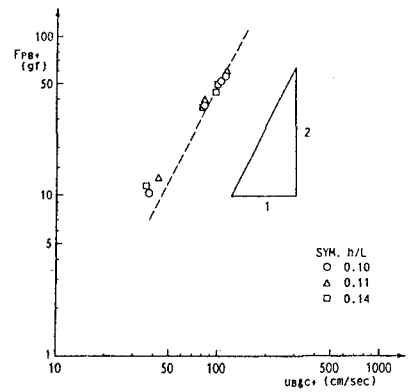


図-13 流速と波力の関係 (測点B)

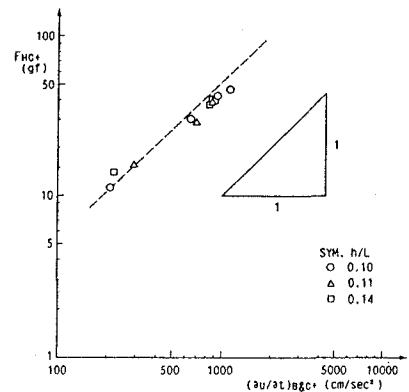
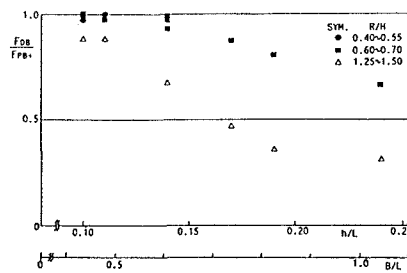
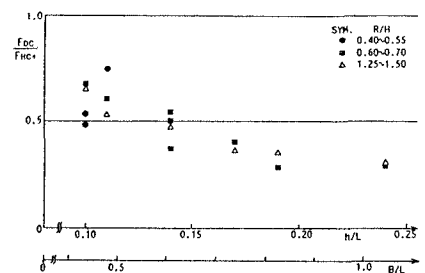


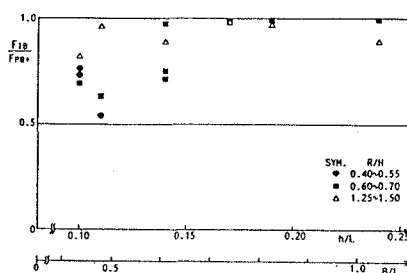
図-14 加速度と波力の関係 (測点C)



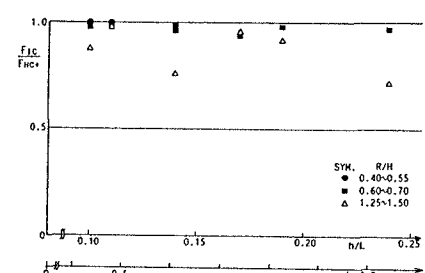
(a) 抗力 F_{DB}



(a) 抗力 F_{DC}



(b) 慣性力 F_{IB}



(b) 慣性力 F_{IC}

図-15 抗力と慣性力の大きさ (測点B)

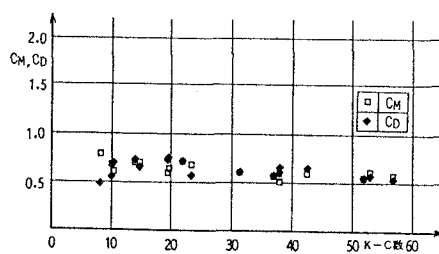
図-16 抗力と慣性力の大きさ (測点C)

による変化を示す。そして、各図の (a), (b) は、それぞれ測点 B, C の結果に対応する。なお、これらの流体力係数を算出するための射影面積および体積は、3. の配列ブロックの場合と同様の値を用いた。

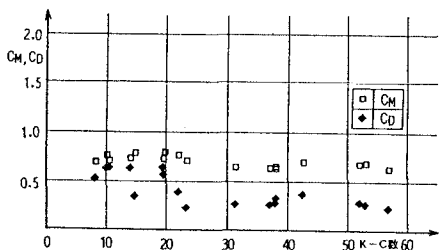
これらの図より、 C_D は K-C 数が 20 程度までは多少のばらつきが見られるが、それ以上ではほぼ一定値となり、法面上の (a) ではほぼ 0.6 程度、また天端上で 0.3 程度の値になることが認められる。このように、法面上で C_D が大きくなるのは、やはりブロックが傾斜角度をもつことによるものと考えられる。そして、3. で示した対応する外縁間隔の配列ブロックの C_D (図-7 (b)) に比較すると、配列ブロックでは K-C 数が 12 以上ではほぼ 0.5 程度であり、測点 C の同じ K-C 数の C_D 値にほぼ一致している。

一方、慣性係数 C_M に着目すると、測点 B, C ではほぼ一定値になっている。そして、これらの C_M は、ほぼ 0.6 ~ 0.8 程度の範囲にあり、測点 B の方が多少小さくなる傾向が見られる。このことから、慣性係数は、抗力係数ほどにはブロックの傾斜角度の影響を受けないものと言えよう。

そして、この C_M と 3. で示した配列ブロックのそれ (図-7 (b)) とを比較すると、配列ブロックでは $C_M=1$ 程度であり、リーフ上の方が多少慣性係数が小さい。この原因については定かでないが、リーフ上の場合、底面が透過性であるため、この透過性の影響を受けて慣性係数が小さく現れたのではないかと推定される。



(a) 測点 B



(b) 測点 C

図-17 抗力係数と慣性係数

5. 結語

1) 偏平な被覆ブロックに作用する波力は、法面上と天端上ではその特性が大きく異なり、これはブロックの設置角度に起因する。そして、天端上の被覆ブロックでは、水平波力において慣性力が卓越するのに対して、法面上では抗力が卓越しやすい。また、マウンドの透過・不透過性の影響は、特に法面上のブロックに作用する垂直波力に強く現れる。

2) 法面上の被覆ブロックでは、平行方向波力が極大値を示す位相で、垂直波力がブロックを法面に押し付けるように作用することから、移動しにくい状況にある。一方、天端上のブロックでは、平行波力及び垂直波力のピークがほぼ同時に出現するため、移動しやすい状況にある。

3) 配列ブロックの波力干渉効果は、水平波力に現れやすく、配列間隔が小さくなるほど顕著になる。そして、被覆ブロックのように十分小さな間隔で配列するとき、極大波力は 3 ~ 4 割程度減少する。また、水平波力に占める抗力の割合は、配列間隔を小さくすると減少し、慣性力が卓越しやすくなる。

参考文献

- 1) 宇多高明・小俣篤・横山揚久：人工リーフの機能と設計法、土木研究所資料、第2696号、1988。
- 2) 宇多高明・小俣篤・横山揚久：人工リーフの被覆材料の所要重量算定法、土木学会海岸工学論文集、第36巻、pp. 648-652、1989。
- 3) 宇多高明・坂野章・竹淵勉：人工リーフの消波効果と構造物周りの海浜変形に関する実験的検討、土木技術資料31-5、pp. 268-273、1989。
- 4) 岩田好一郎・小山裕文：浅海域における水平水粒子速度の簡便な算定式、土木学会第31回年次学術講演会講演概要集 (II)、pp. 303-304、1983。
- 5) 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、土木学会海岸工学論文集、第37巻、pp. 526-530、1990。