

ステップ型リーフ上での波とブロックの安定

佐藤 道郎

(受理 昭和62年5月30日)

EXPERIMENTAL STUDY ON THE CHANGE IN THE BREAKING WAVE HEIGHT AND THE BEHAVIOR OF ARMOR BLOCKS ON A STEP REEF

Michio SATO

The change of wave height, and setup of the mean water level over a shallow step reef, after breaking at the seaward edge, are investigated experimentally. And waves which attack a seawall located not so far from the edge are examined, as well.

The results show that the current evaluation method of the wave height gives underestimated values for the wave on a step reef. So, an empirical method for the estimation of wave height over a step reef is proposed.

The behavior of armor blocks, attacked by high breaking wave in front of a seawall on a step reef, is also examined experimentally.

1. 緒言

沖縄や鹿児島県の離島の海岸に発達するリーフは、来襲する波浪に対して一般の海岸とは異なった様相を示すが、通常は天然の潜堤として波のエネルギーを減衰させる。しかし、鹿児島県の沖永良部島の和泊港や知名漁港では海底断面がステップ状になって水深が急に浅くなっている。その水深急変部からあまり離れていないリーフ上に堤防が築かれており、その前面には消波ブロックが置かれている。その一つ50トンもあるブロックが台風の高波によっていくども「設計上考えられない」被害を受けてきた。

本文はこれまで繰り返されてきたブロックの被害がどんな所に由来し、どうしたら良いかと言う点について考える上での根拠を与える資料を得るべく行ってきた実験とその結果について述べたものである。

2. 知名漁港にみる被害状況の概略

知名漁港についてこれまでの被害状況を見てみると次のようである。

昭和55年

6月……………護岸・消波工の断面決定

9月—翌年3月…既設護岸（5m）のかさ上げ異形
ブロック30t、法先のみ50t設置

昭和56年

8月31日……………台風18号、沖波波高14m、被災
前面波高5m、被災延長30m

10月21日……………台風24号、沖波波高14m、被災前
面波高10m、被災延長30m

昭和57年

2月—7月……………復旧工事

8月24日……………台風13号、沖波波高11m、被災前
面波高7m

昭和58年

3月……………復旧工事

9月26日……………台風10号、沖波波高？、被災前
面波高9m

12月—翌年3月…復旧工事

写真1は台風後ブロックがなくなってしまった様子
を示すもので、写真2は7.5mの高さの堤防をブロッ
クの破片が乗り越えて来たことを示すものである。

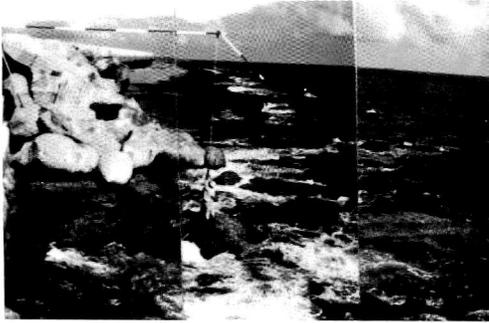


写真1 手前のリーフ上のブロックがなくなってしまった



写真2 7.5mの高さの堤防を越えてきたブロックの破片

このように復旧工事をしたかと思えば台風に襲われて被災するということを繰り返してきた。しかし、最後の復旧工事に当たっては模型実験により消波工の断面を検討するとともに、被害を軽減すべく考えられ、その後あまり大型の台風にさらされることなく今日に至っている。

3. 模型実験による被災状況の検討

まず、50トンものブロックが台風時の波でそんなに簡単に動くものなのか、また、動くとなればどのような様相を呈してブロックが被災するのか、その様子のあらましを見るために模型実験を行った。

(1) 実験方法

長さ30m、幅1m、高さ1.2mの造波水路に図1に示すような断面のリーフ模型を設置した。模型は鋼製の枠に鋼板を張ったもので水路床にボルトで取り付けられている。実験に用いたブロックは図2に示すような形状のもので、重量730g、体積267cm³、高さ11cmのも

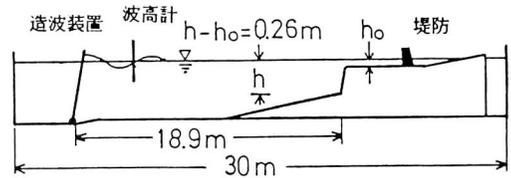


図1 実験装置

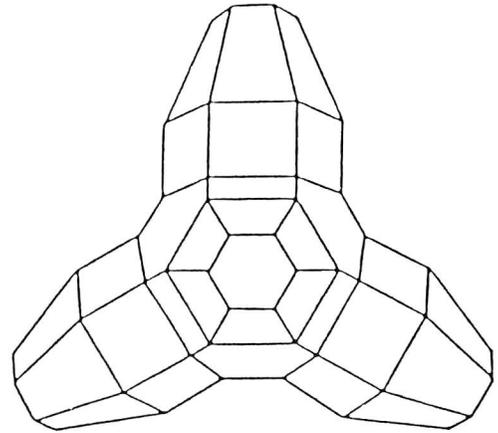


図2 実験に用いたブロック

のである。これは模型縮尺を1/41として現地で50トンのブロックである。

一様水深部の深さは68.5cmとし、リーフ前面まで1/15の勾配を持つ斜面で接続してある。図1に示した3ヶ所で容量式波高計で水位を計り、ペン書きオシログラフで記録した。水路側面と上部に2台のビデオカメラを設置してブロックに作用する波とブロックの動きを撮影した。波の条件は昭和56年の19号台風で沖永良部島の知名漁港沖で最大波高14m、有義波高11m近い波が記録されてるとのことであったので、それを参考に周期9秒と11秒で、リーフ前面で波高が2~14mの範囲の波について実験を行った。実験波は規則波であるが、参考のために不規則波の作用下での観察も行った。また、一様勾配斜面上の同様な水深の所にブロックが置かれた場合についても実験を行い参考とした。

(2) 実験結果

二層三列に堤体前面に積まれた消波ブロックの波による動きを調べた結果のあらましは次のとおりである。

イ. 上層に積まれたブロックのうち、座りの悪いものは入射波高6m(換算沖波波高5.5m、リーフ上の波高

2 m) 程度で動くが、座りのよい格好におさまれば動きはやむ。

ロ. 入射波高 8 m (沖波波高 7 m, リーフ上 3 m) 程度の波を受けるとブロックの重量だけでは波力に抵抗できなくなり、後ろに堤防などの支えがないと滑動を始めるものが出てくる。だが、動きが拘束されている場合にはあまり問題にはならないと思われる。また、実験はリーフ表面が滑らかな条件のものであるが、現地では滑動に対する抵抗がもっと大きいであろう。

このイ、ロの場合の動きは各ブロックが座りのよいところに落ち着く過程での動きが主であり、ゆるく積まれたものは動きが大きいことが考えられる。

ハ. 入射波高 11 m (沖波波高 9.5 m, リーフ上 4.8 m) 程度の波になると下層にあって上のブロックで押さえられているブロックも動くようになる。したがって、これを越える波の作用を繰り返し受けて積まれたブロックがバラバラになる場合も出てくる。実際には前述のように底面との摩擦によって滑動が抑制されると思われるが、後肢を中心とした波力による転倒モーメントに由来する前肢の上下動によりリーフ面や他のブロックを繰り返し叩くことになり、これはブロック自体の破損とそれによる軽量化と流失の危険に晒される結果となる。

ニ. ブロックの動きの程度は積み方、すなわち、ゆるいかどうか、整積みか乱積みか、二層か三層か、等により差異があるようである。

ホ. リーフ先端から堤防までの距離が相当利いてくる。堤防模型を 10 cm (約 4 m) 程度後退させたらブロックの動きがかなり小さくなった。また、堤防の高さも影響し、高いほど戻り流れが強くなってブロックが流されやすくなる傾向がある。現地での被害が局部的に何ヶ所かに集中しているが、距離が特に利いているものと思われた。

さて、設計上動かないと考えられたブロックも実際には台風時の高波では十分動き得るものであることが実験的にも確認された。

では、どこに問題があったのであろうか。考えられる主要な点は、ブロックに作用する波が適切に評価されていたのであろうか、という点と、ブロックの安定に関する評価はどうかであったか、の二点であろう。

4. ブロックに作用する波の状況

実際の設計においてはリーフ上の波高の算定に高山

の式が用いられた。この高山の式は合田²⁾による不規則波の碎波変形計算を基に十分の一勾配斜面に平らな礁原が続く様なリーフモデルに対する不規則としての波高変化を与えるものである。

したがって、波は斜面上で砕け、リーフ上に達する波は碎波後のある程度小さくなった波であるような状況のものである。だから沖波波高をどんなに高く設定してもリーフ上の波高は前述の被災前面波高のような高波が予想されることは無い。これは、図 3 の設計における波高変化がリーフの沖側から波高が逡減していることから明らかである。計算に当たってリーフ前面に仮想の 1/10 勾配の斜面が置かれているからである。

しかし、知名漁港や和泊港では実際には断面急変部の沖側の水深は十数メートルあり、相当の高波でも碎波せずにリーフ前端に衝突して重複しリーフ上へ乗り上げる。この様なところでは図 4 に示すように乗り上げた高波は、実験によると、図中の(i)のように水の壁となって激しくブロックに打ちつける。

写真 3～5 は台風時の波の状況を示したものである。海面上 7.5 m 程の高さの堤防ごしに波裏が見えたり、燈台をてっぺんから飲み込んでしまうがごとき波の様子を見ると実際にも相当の高波にさらされていることが分かる。この様な高波にさらされた結果、写真 2 のように 5 m 近い高さを持つ 50 トンの消波ブロックの足が折れ、堤防を乗り越えて堤内に飛ばされている。脚が折れて軽くなったブロックはリーフの海側にも流されて落ち込んでしまう。この様な状況のもとでは 50 トンであろうが 100 トンであろうが関係ないような感がある。

すなわち、式の想定している状況と実際とは違うのでこの様な水深の急変するような場合にそのまま適用すると過小評価となってしまふ。

リーフ上での波の変形に関しては、ここで述べた高山の式や、Battjes and Janssen³⁾ (1978) の碎波変形計算法に基づく Gerritsen⁴⁾ (1980) の方法があるが、斜面をへて礁原に続くようなリーフで適用されるもの、先に述べたようにステップ型のリーフに適用するのは無理と思われる。

一方、ステップ型リーフの様な水深急変場での波の変形に関しては Lamb⁵⁾ (1932) 以来 Le Mehaute⁶⁾ (1960), Newman⁷⁾ (1965), Miles⁸⁾ (1967), 井島・佐々木⁹⁾ (1971), 日野・灘岡^{10,11)} (1984, 1985), 他、によって理論的に論じられてきている。

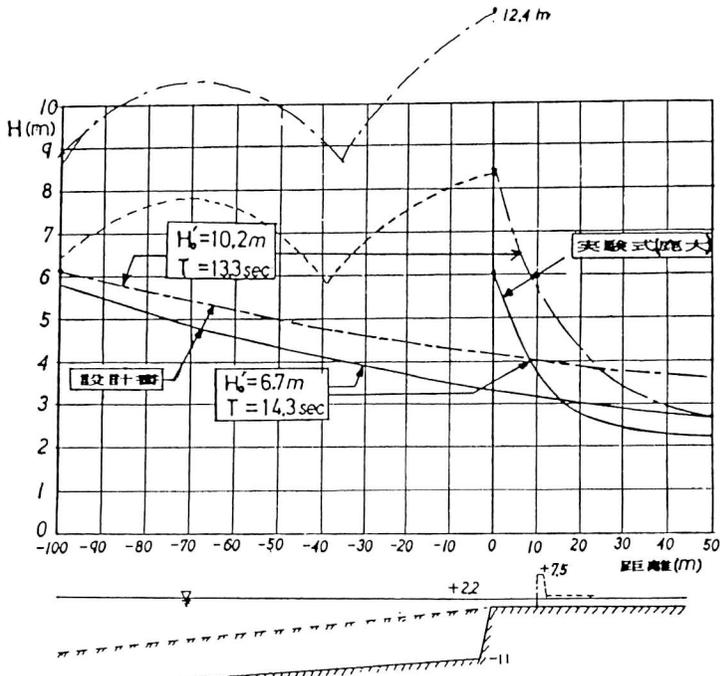


図3 設計における波高変化の計算および実験式による計算の結果

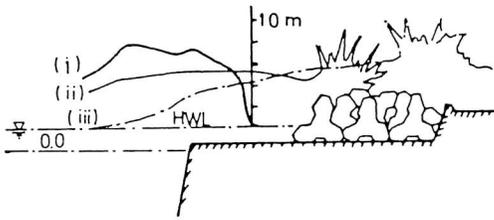


図4 ブロックに作用する波



写真4 台風時の波(2)

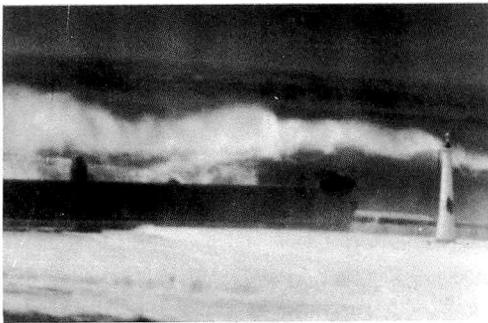


写真3 台風時の波(1)



写真5 台風時の波(3)

しかし、ここで問題としているような高波がくるような場合には、波高がリーフ上の水深より大きくなり谷の位相において海側の水面がリーフ天端より下がってリーフとの間に不連続が生じ、リーフ上では碎波する。したがって、連続性を前提としたこれらの理論は適用できない。

この様な場合について、河野・津嘉山¹²⁾ (1981) は運動量とエネルギーの収支に基づいて解析しており、リーフ上の波高を通過率 K_t (=通過波高/入射波高) として与えている。水深急変部でリーフへ乗り上げた波は進行とともに急速に波高を減衰させるがある程度進むと減衰のしかたも小さくなる。 K_t の距離に対する依存性は表されておらず、これで与えられるのは十分な広さを持つ礁原を進んで波高が一定値に近づいてからのものであろう。リーフ先端付近の波高変化の激しいところには適用できない。

実験的には河野・津嘉山¹²⁾ (1981)、津嘉山¹³⁾ (1984) が若干のデータを示しているが実用上十分といえるものではない。

この様な状況で、設計に当たり現状では適切な波の評価方法もなく、多くのリーフの波の計算に用いる高山の式を採用したのはやむを得ないことであつたと思われる。それも、単に高山の式に基づいて設計波を決めたわけではなく、実際には燈台をも飲み込んでしまうがごとき波の襲来を念頭に置いて、かなりの余裕をみた波高を採用しており、適切な判断であつたと思われるのだが、それでも後述の実験式と比べると小さめに見積られていると思われる。

沖波波高 $H_0' = 10.2\text{m}$ に対してリーフ上の波高 6.0m を採用しているが、これは後述の実験式ではリーフ先端で 8.4m 程度に見積られる。距離とともに急速に減衰するものの先端のブロックにはかなり大きな波が作用することが考えられる。

5. リーフ上での波の変形に関する実験

これまでみてきたように本文中で問題としているリーフでのブロックの被災はひとつにはリーフ上での波高の評価に問題があると考えられ、より適切な評価法が望まれる。しかし、碎波を伴う短周期波の問題であるため解析的な取扱はかなり難しそうに思われる。

そこで、まずはステップ型リーフに高波が打ち上げて碎けながら変形して進む場合のリーフ先端からあまり離れていない領域における波高や平均水位をどの程度に見積れば良いかという問題に対して目安を得るた

めに実験を行った。

(1) 実験方法

実験装置は前述と同じである。リーフ上の水位を水路側面からビデオカメラで撮影録画するに当たり、0.1秒刻みのカウンターを作って写し込んだ。後になれをもとに0.1秒毎に水面をテレビ画面から読み取った。これからリーフ上の各点における水位の時系列データや波高、水位が得られる。

実験波は周期1.0~2.6秒、波高10~16cmの範囲の規則波であり、波高と周期のさまざまな多数の組合せで行った。本実験で対象としているのは波高がリーフ上の水深よりも大きな波で、峰のときにはリーフ先端で碎けて波高を急速に減じつつ進み、谷のときにはリーフ前面でリーフ天端より水面が下がり、リーフ上の水は段落流のように海側へ流れ落ちて行くような状況を呈するような場合である(図5)。

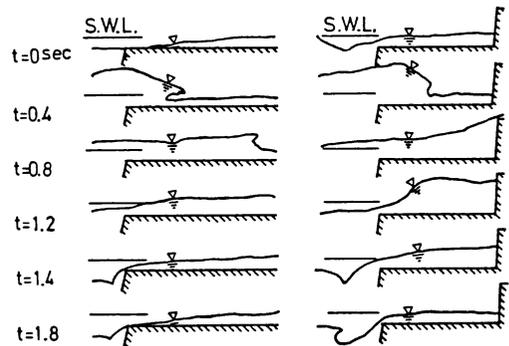


図5 0.4秒毎の水面形(左)堤防無し(右)堤防あり

リーフ上に堤防のない場合とある場合では当然水位や流れの状況は異なってくる。そして、堤防のある場合の状況を把握することが大事であるが、その場合入射波・リーフ形状等の条件に加えて堤防の位置と高さに関係してくることになる。だが、それはリーフへ打ち上げた波と堤防からの反射波の重合とみることができ。そこで、まずリーフ上での波の変形の基本的な性質をつかむためにリーフ上に堤防のない場合について、リーフ上の静水深0, 5, 10cmとして行った。

さらに、堤防を設置した場合について行った。堤防の位置はリーフ先端から60, 120cmの2種類、天端高は9, 18cmの2種類について実験した。この場合の静水深は5cmである。

計測の対象としたのは波高が一定になってから再反射の影響が現れるまでの数波である。

(2) 実験結果

a. 堤防がない場合

この場合、リーフ上の波高 H について次の無次元的關係を想定することができよう。

$$\frac{H}{H_0'} = \phi \left(\frac{X}{H_0'}, \frac{H_0'}{L_0}, \frac{h}{L_0}, \frac{h_0}{h}, [Re] \right)$$

x はリーフ先端からの距離、 H_0' は換算沖波波高、 L_0 は沖波波長、 h はリーフ前面水深、 h_0 はリーフ上水深、 Re はレイノルズ数である。リーフ上をある程度の距離にわたって進む場合の波高減衰を問題にする場合は Re も関係するが、ここで問題にしている場合につい

ては考慮しなくても良いであろう。

実験結果をさまざまな無次元変数の関係として表してみたが、 H_0'/L_0 , h/L_0 , h_0/h をパラメーターとして、距離に伴う波高の変化を H/H_0' と x/H_0' の関係として求めてみると、 H_0'/L_0 が小さく、リーフ上で碎波するような場合には h_0/h によって異なるものの H_0'/L_0 と h/L_0 による差異は小さく、似たような変化を示した(図6)。 x/H_0' の大きいところで実験値が少し波打っているが、リーフ模型の奥の部分は1/15の勾配の斜面となっているためにそこでの反射と思われる。

リーフ上に波が打ち上げると、岸から水が堆積して平均水位が上昇しはじめ、次第に海側に向かって水深が増してくる。本実験では7~8波でリーフ上全域の平均水位が増して定常的な状態になったが、このときには造波板での再反射の影響が現れてくる。

実際には礁原が十分広い場合、波は高波がずっと続くと言うことはなく数波の高波の後にいくつか小さな波が続くことが多いので、波群の周期に応じて平均水位は変動するであろうが、実験のような著しい堆積によって上昇したままということはありません。

そこで、堆積の影響の少ない3~4波めの平均水位を調べてみた。図7から静水深0のときにはリーフ上で入射波の1割前後に相当する平均水位となっている

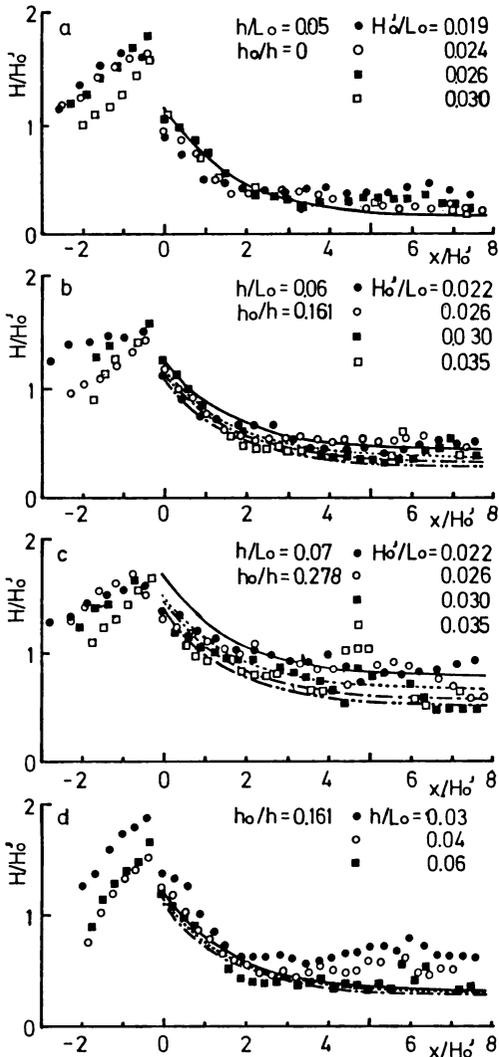


図6 リーフ上の波高変化の実験結果

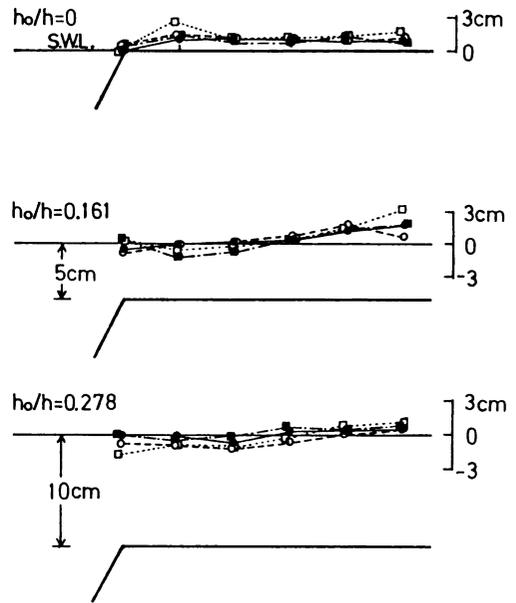


図7 リーフ上の平均水位

が、ある程度の静水深がある場合には、礁原が広い場合にはそれほどの水位上昇は考えなくてもよいように思われる。リーフ上で砕けた波の突っ込み点付近で平均水位にいくぶんかの低下がみられる。また、岸よりの方で水位の上昇がみられるが、前述のように、ここに示されているよりも岸側の水位の上昇の影響の現れたものである。図8は入射波の波高や周期による差異を見ようとしたものであるが、あまり系統的なものとはつかめなかった。

b. 堤防がある場合

リーフ上に堤防を設置した場合には、堤防での反射、後続波と反射波の衝突・重合などがリーフ上の波の波高分布を決める要素として加わってくる。そして、この場合リーフ先端から堤防に至る区間での相対的位置による波高分布として実験結果を表示した方がつごうがよく、 $H/H_0' = x/l$ 、(1:リーフ先端から堤防までの距離)との関係で図9に示した。

(a-1), (a-2)は図6でいうと x/H_0' がほぼ3~5程度の所に堤防が設置された場合のもので、(b-1), (b-2)はその2倍はなれたところに堤防を設置した場合の結果の例である。また、(a-1), (b-1)は堤防天端高の低い場合、(a-2), (b-2)は高い場合のものである。

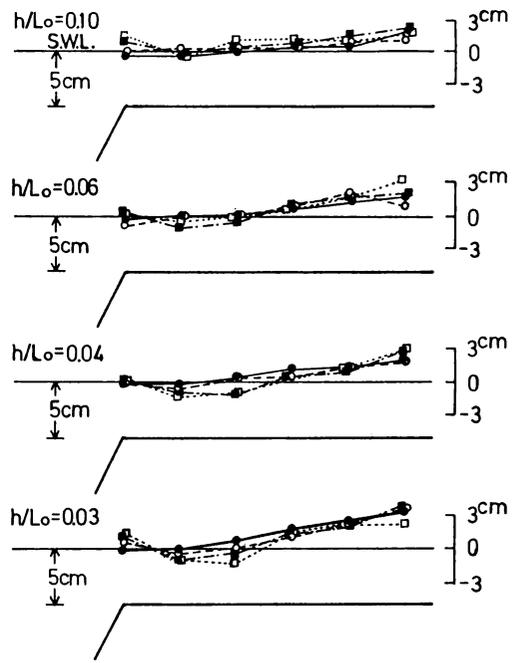


図8 リーフ上の平均水位

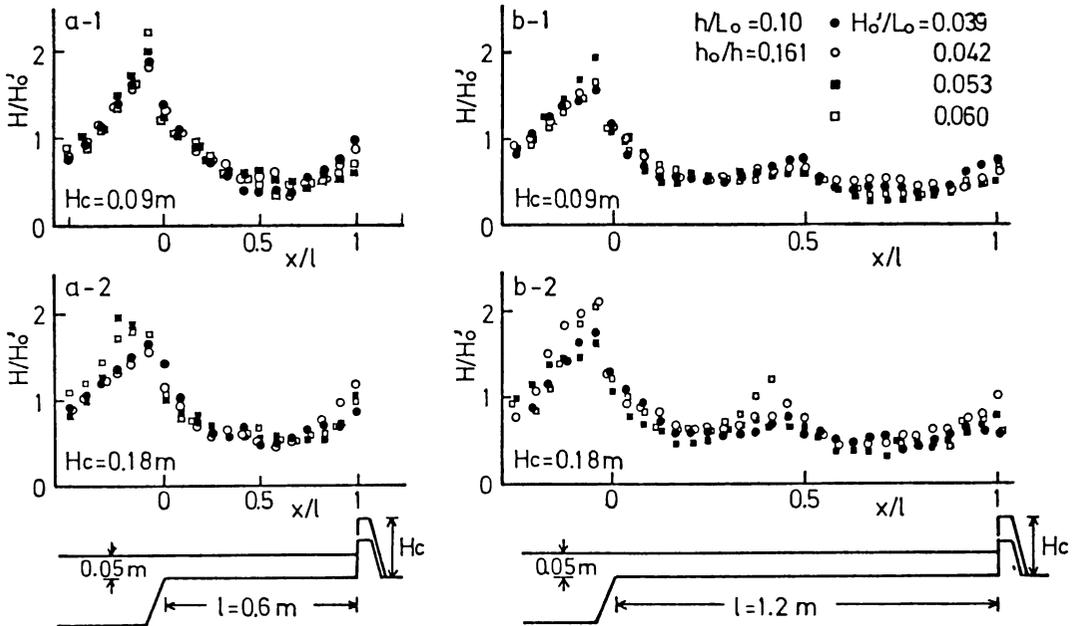


図9 堤防があるときのリーフ上での波高変化

堤防まで距離があまり大きくないときには、リーフ上へ打ち上げた波は段波状となって堤防に当たり、波高の大きいときには堤防で越流を生ずるとともに反射して海側へ戻る。その際越流が生じるのでむやみに高くなることはないものの、天端高を高くすればするほど水位も上昇する。そして、天端高が高いほど強い戻り流れによりブロックは流されやすくなる。

堤防までの距離がリーフ上で波長の半分以上になると、堤防からの反射波はリーフ上で後続波と衝突するようになる、その衝突するところでは局部的に波高が高くなる。その場所はおおよそ堤防からリーフ上で波長の半分毎の所と考えておいてよいであろう。

図10に示したようにリーフ先端からあまり離れていない所に堤防を設けると数波の波でもかなり水位上昇がみられる。天端高が低い場合には越流によって波高が大きくなってそれほど差異はないが、天端高が高い場合には波高が大きいほど水位が上昇する。

打ち上げられた水量と堤防からの越流ならびにリーフ先端で谷の位相のときに海側に戻る水量が釣り合うまで上昇することになると考えられるが、再反射影響が出てくるまでの限られた波数での結果である本実験結果がその様な平衡状態に達していたかどうかは分からない。

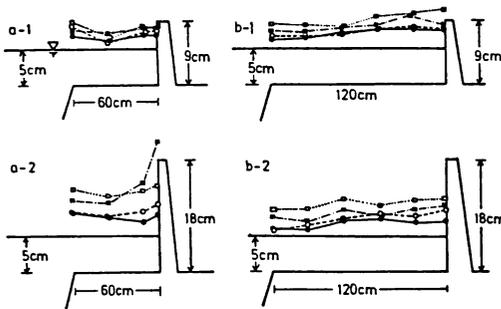


図10 堤防があるときのリーフ上での平均水位

6. リーフ上の波高変化の概算法

図6に示したようなリーフ上での波高変化について理論的に詰めた議論をするところまでには至っていないので、まずは実験データに基づいて概算法を考えることとする。

大ざっぱに見ると H/H_0' と x/H_0' の間には次の関係を想定できそうである (図11)。

$$\frac{H}{H_0'} = A + B \exp\left(-C \frac{x}{H_0'}\right) \quad (1)$$

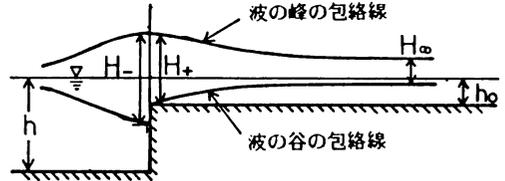
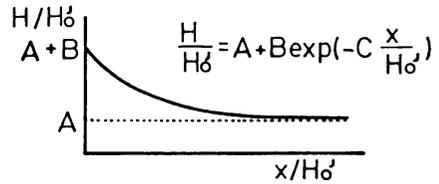


図11 波高変化のモデル化

このとき、Aはリーフ上を碎けた波が波高を減じながら十分に進み、ほぼ一定に近づいた波高 H_{∞} を H_0' で無次元化したもので、ここでは孤立波の碎波条件を含頭において次で近似してみる。

$$A = \frac{3}{4} \cdot \frac{h_0 + \Delta h}{H_0'} \quad (2)$$

一方、(1)式で $x=0$ とおいたときの波高を H_+ と表すと、リーフ先端で谷の位相のときに海側の波高 H_- と不連続になるような状況のもとでは近似的に $H_+ = H_-/2 + h$ とおけ、また(1)式より $H_+ = (A+B)H$ であるから B は次のように表される。

$$B = \frac{1}{2} \cdot \frac{H_-}{H_0'} + \frac{1}{4} \cdot \frac{h_0}{H_0'} - \frac{3}{4} \cdot \frac{\Delta h}{H_0'} \quad (3)$$

H_- は水深急変部での入射波高 $H_i = K_s \cdot H_0'$ (K_s : 浅水係数) と反射率 K_r により $H_- = (1 + K_r) K_s \cdot H_0'$ と表せる。C については実験で得られた波高変化から種々のパラメーターとの関連を検討したが、あまりハッキリした関連はつかめておらず、かなりばらついた値となっていたが、平均的なところを取ってここでは $C = 0.6$ とした。その結果、次のようなリーフでの波高変化の概算式が得られた。

$$\frac{H}{H_0'} = \frac{3}{4} \cdot \frac{h_0 + \Delta h}{H_0'} + \left\{ \frac{1}{2} (1 + K_r) K_s + \frac{1}{4} \cdot \frac{h_0 - 3\Delta h}{H_0'} \right\} \times \exp\left(-0.6 \frac{x}{H_0'}\right) \quad (4)$$

反射率 K_r については、リーフより海側の領域ではポテンシャル理論に基づく解が適用できるものとして既往の結果の例を図6の中に示してある。また、A、Bとして想定した(2)、(3)式と実験値との対応は図12に示した。計算にあたって $\Delta h/H_0'$ は0.1とした。

設計波についてこの概算法をもとに計算して見ると

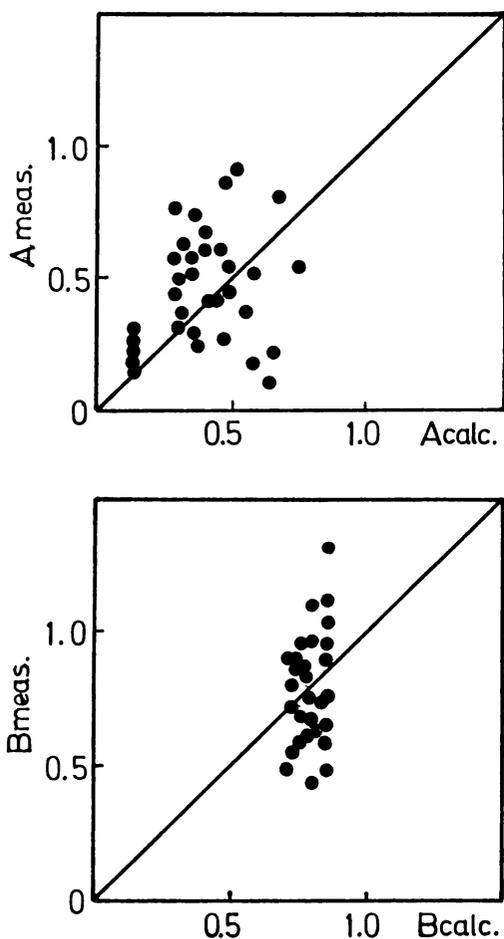


図12 係数A, Bの実験結果との比較

図3に示したようにリーフ先端付近ではかなりの違いがある。そして、ステップ型リーフには上式を用いる方がより実際に近いものを推定できると思われる。なお、水深急変部の沖側については既往の断面急変場での波の変形理論であらましを推定できよう。図中の沖側の破線は計算結果ではなく、あらましこんなことであろうというものを示したものである。急変部の両側で波高が不連続になっているが、これは急変部では谷の位相で水位がリーフの天端よりも下がるが、リーフ上は天端より下がることはないということによって生じたもので、峰の位相においては水位は連続である。

7. ブロックの受ける波力と挙動

リーフ上におかれた消波ブロックが高波によって破損したり、流されたりしており、巨大なブロックなど

けに運搬、据え付けにかなりの費用を要するため、災害が繰り返されると多大な損害となる。ブロックは当初二ないし三層に積まれたが、その設計にあたってはハドソン公式が用いられて30トンブロックで十分な結果が出された。

ブロックの模型の動きを実験によって観察してみると、水平床上での二ないし三層に積まれた消波ブロックの挙動は、ハドソン公式の基にあるイリバーレン公式の力学の世界の話ではないように思われる。

ブロックが斜面上にあるわけでもなく、斜面を形成しているわけではないが、ハドソン公式を適用するためには定義しようのない斜面勾配の数値を与えなければならぬなど、かなりの無理を余儀なくされてきたようである。

だが、法先部ブロックについては移動の可能性を考慮し、50トンブロックを採用することとして、滑動ならびに転倒に対する安定性が検討された。その結果、転倒に対しては安定であるものの、滑動に対してはやや重量不足で、60トンが必要とされた。しかし、ここで採用された形のブロックでは50トンが最大のものであるから現実にはそれを採用せざるを得なかったものと思われる。

そして、最初の被災後は30トンのブロックは50トンのものに換えられ、その意味では現状ではハドソン公式でブロック重量を決めたというよりもむしろ供給できる最大のものを使っているという方がよいのかも知れない。

3. で述べた実験での観察から、水平床上でしかも砂地でなく硬い盤上に二層ぐらいに積まれたブロックでは、ブロックの滑動が消波工として安定性を考える上で重要である。条件によっては、先端部のブロックは海側に滑動し、消波工が緩んで崩壊に至る場合もあり、滑動しないというのがこのような消波工の安定の条件の一つとなる。

さらに、転倒について、ブロックが50トンもあるようなものになると、ひっくり返らないまでも、あたかも、相撲取りが四股を踏むような状況を呈するようになると脚が折れて軽くなって飛ばされやすくなることが考えられるので、その様な観点から安定を考えていく必要があると考えられる。また巨大ブロックは脚の付け根の太いものが望ましいと思われる。

そこで、水平床上に二ないし三層に積まれた消波ブロックの安定性の評価に係る基本的な事柄について検討するために実験を行った。

(1) 実験方法

リーフ上でのブロックの動きの基本的な性質を把握しておくために単体としてのブロックの挙動を調べた。

リーフ上の波高が急速に通減するところではブロックの受ける波力も場所毎に異なることが考えられる。また、堤防があれば、その位置や高さによって状況が異なるであろう。そこで、まず、堤防のない状態でのブロックの受ける波力やブロックの動きを調べた。

リーフ先端より0.25mから1.25mの範囲で0.25mごとに流速計、波高計、圧力計付きのブロック、そのままのブロックを置いた。

圧力計付きのブロックは動きを拘束してある。もう一つのブロックは波の作用によってどんな動きをするか観察するためのものである。波圧は底面から2.3cm, 4.5cm, 6.7cm, 9.1cmの高さで測定した。用いたのはPs型超小型圧力変換器(ps-2KA, PS-2KB, 共和電業製)である。

また、リーフ先端より60cm(現地換算24.6m)あるいは120cm(49.2m)のところに高さ18cm(7.38m)あるいは9cm(3.69m)の堤防模型を設けた場合についても実験を行い、堤防の影響を検討した。

この場合にはブロックは打ち上げた波によって堤防のほうに押し込まれるような作用を受けるとともに、戻り流れによって海側に流されるような作用を受ける。それらの結果として結局どちらへ動くのか、また、場所やブロックの向きによってどうかといった点を調べるために岸に平行に6個のブロックを置いて10波の作用の結果としてどう動いたか調べた。なお、6個のうち3個ずつ向きが反対になっている。

また、ブロックの脚に10mm角の棒(アルミニウム製)を埋め込み、歪ゲージを張り付けて、打ち寄せる波の波力と戻り流れに抗力を調べ、各々のブロックに及ぼす影響を検討した。

ブロックの挙動を見るのにブロック中に3成分の加速度計を埋め込んで、それにより動きを調べることも考えて試みてみたが、測定も後始末も厄介な割に、ビデオカメラによる映像から得られる情報に比べて状況がつかみ難いことからそれは止めた。

実験時のリーフ上水深は5.8cm(2.4m)とし、実験波の周期は1.0, 1.4, 1.8, 2.2, 2.6秒、波高は2cmの範囲の波である。

(2) 実験結果

a. 堤防を設置しない場合

リーフ上に波が乗り上げてから碎波しつつ進んでいく過程でブロックに及ぼす波圧の分布の変化を示したのが図13である。全般的にリーフ先端からの距離にもなって小さくなっている。波圧分布はだいたい一様に近い。

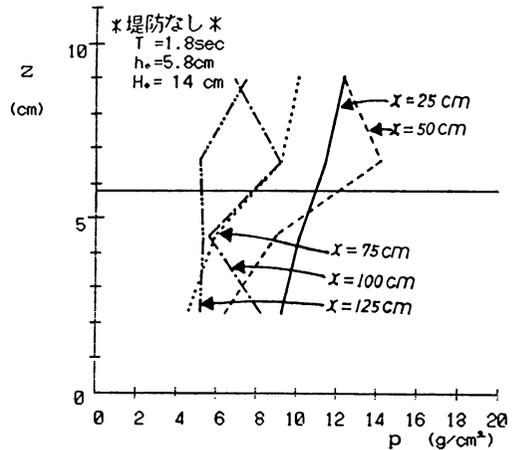


図13 波圧分布の変化

リーフ上の波高と波圧の関係を示すと図14と図15に示すようになった。図中の点線は碎波圧の広井公式によるものである。広井公式を上限とするような波圧を示しているととても良いように思われる。即ち、広井公式の波圧にブロックの投影面積を掛けて、それがブロック重量に摩擦係数を乗じた値より大きければ移動するといった議論でも単体としてのブロックの移動についてはいけそうである。

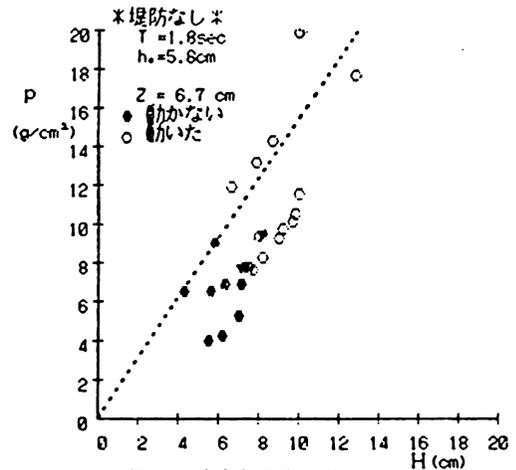


図14 波高と圧力の関係(1)

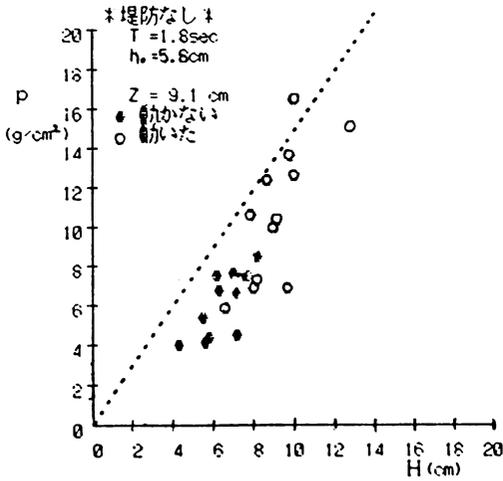


図15 波高と圧力の関係(2)

一方、設計においては次の関係が用いられた。

$$P = S_H \cdot W_0 \cdot \frac{V^2}{2g} \cdot A$$

$$V = Cr \sqrt{2.28gH}$$

ここで、Pはブロックに働く波力だが抗力だけを考えている。W₀は水の単位重量、Vは流速、gは重力加速度、S_Hは抗力係数で1.0の値を用いている。係数Crは0.4にとられている。

PとHの関係について実験結果に基づいて調べてみると、図16のようである。図中の実線が上式によるものである。破線は抗力係数を2.0にとったものである。図17はVとHの関係を示したもので、実線は上式によるものである。実験値の方がいくぶん小さい。従って、実験値から見れば、vはいくぶん大きめに評価しているが、波力は小さめであるので、抗力係数をもっと大きく見積る必要がある。そして、その場合、

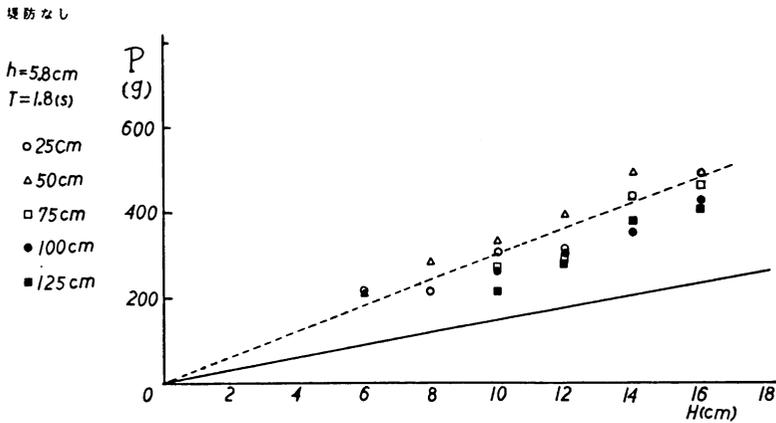


図16 波高と波力の関係

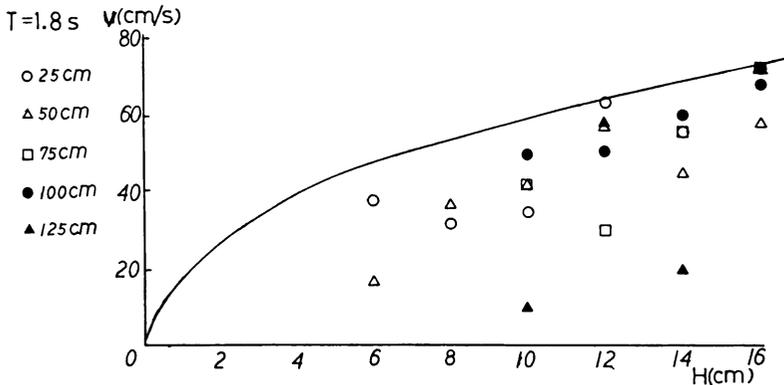


図17 波高と流速の関係

現存のブロックでは安定条件を満たし得なくなるであろう。

このようにみていくと、本文で問題にしているような状況のもとでは、消波ブロックをおくこと自体の可否が問題となってくる。置くとすればなんらかの方法で極力ブロックの動きを拘束する必要がある。現地では前列のブロックの動きを拘束するためにリーフ上に溝を刻んで、また、厚く積み上げるなどの工夫が成されている。

b. 堤防がある場合

堤防がある場合、入射波による岸向きの波力と戻り流れによる力（これを便宜上沖向き波力と呼ぶ）を受ける。図18は岸向き波力の実験結果の例であるが、これは先の堤防がないときの結果と同様波高に比例して

いる。

一方、戻り流れによる沖向き波力は図19に一例を示すように波高による差異はあまり見られず、波の周期に大きく影響される。周期の長い波ほどリーフ上に多くの水を堆積させ、戻り流れは強くなる。

次に、堤防がある場合にリーフ上でブロックが波や戻り流れによってどちらの方向に移動するか調べた結果を図20に示した。リーフ上の矢印が10波の作用の結果として移動した方向である。

上向きの矢印は、その地点で入射波と堤防からの反射波が衝突することを示している。

この結果から堤防に近いところでは堤防の方に動かされることが分かる。一方、どういう条件のもとで海側に流されるかという点についての詳細は定かでない

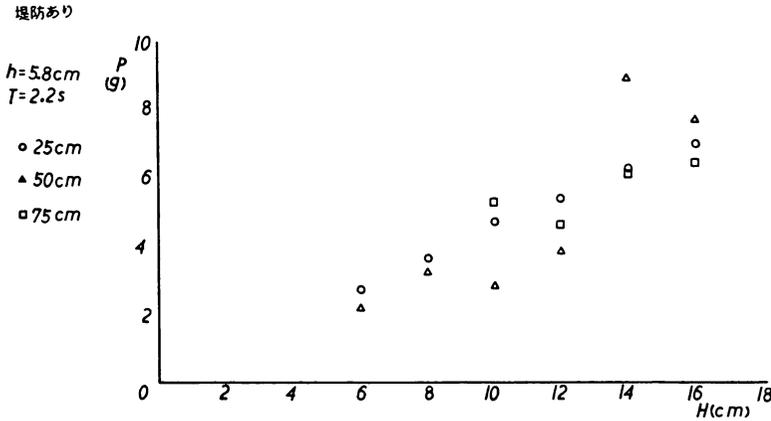


図18 堤防がある場合の波高と岸向き波力の関係

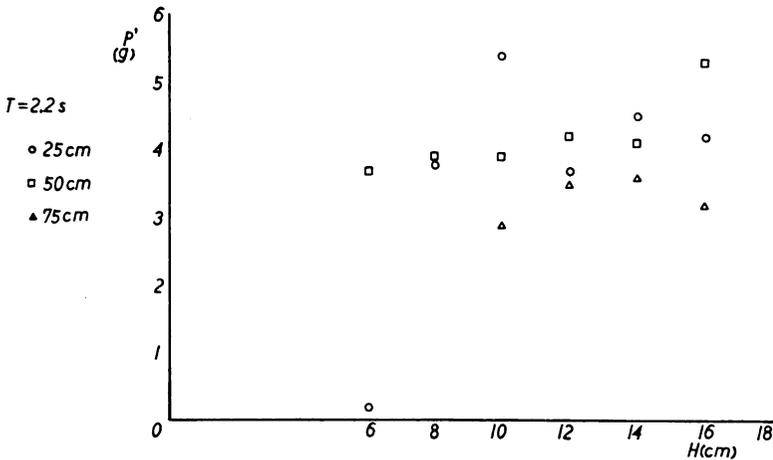


図19 堤防がある場合の波高と沖向き波力

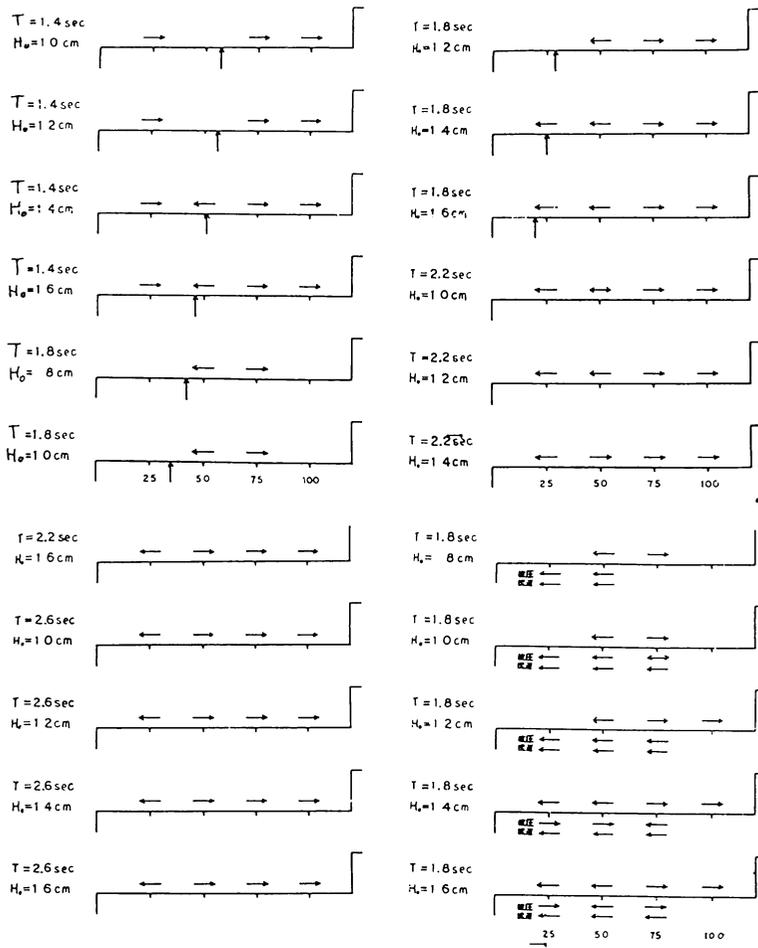


図20 ブロックの移動方向

が、周期が長くなると海寄りの所にあるブロックが海側に流されるような傾向を読み取ることが出来そうである。周期の長い波ほどリーフ上に水が堆積し、水位は上昇して、リーフ先端で谷の位相のときに大きな水面勾配が出来て強い戻り流れが生じる。それを反映しているものと思われる。

8. 結 語

ステップ型リーフ上での消波ブロックの高波による破損、流失といった問題に関連して、リーフ上での波の変形、消波ブロックの挙動について実験的に検討を進めてきたが、本文ではその結果について述べた。

また、設計についても若干検討してみた。設計ではまずリーフの波高が過小評価されてもやむをえない

状況下で、実際の状況を考慮してかなりの余裕を見込むことにより過小評価を避けようという気持ちが察せられるものであったが実験式と比べるといくぶん小さめであった。

ブロック重量の評価も、波高の見積りのことはさておいても、若干小さめであった感もある。しかし、それでも一番大きなブロックを採用しており、もし、波を実際的なものに近いものを見積ったとすると、その前面に消波ブロックを置くというやり方は成り立ち得ないという結果を出さざるを得なかったと思われる。

沖永良部の被災に関してブロックを置くよりも堤体そのものを越波の少ないものにするの方がよいという考えもあり、その方が理にかなっていると思われた。

現在ブロックの置き方を工夫することによりもたせ

ようとしているが、耐えられるかどうか興味深い点である。

謝 辞

本研究を進めていく過程で、当時学生であった新屋隆浩、浦上博行、羽田好勝、中江周作、吉松秀雄、徳永企世志、小原淳一、木原尚武の諸君には実験、データ整理、計算等で多大な助力を得たことを感謝します。

模型の製作、計測システムの整備等では中村和夫技官に負うところが大きい。ブロック模型は三井コンクリート K.K. に提供して頂いた。感謝の意を表します。

本文中で引用の写真、その他鹿児島県沖永良部土木事務所には貴重な資料を提供いただいた。記して謝意を表します。さらに、日本気象協会沖縄支部の西村達郎氏には沖縄のリーフの波についてご教示いただいたことに謝意を表します。

本研究の一部は昭和60年度ならびに昭和61年度の科学研究費（自然災害特別研究(2)）によって行われたことを記し、関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 高山知司・神山豊・菊地治：リーフ上の波の変形に関する研究，港湾技研資料，No. 278，1977
- 2) 合田良実：浅海域における波浪の碎波変形，港研報告，第14巻，第3号，1975
- 3) Battjes, J. A. and J. P. F. M. Janssen：Energy loss and set-up due to breaking of random waves, Proc. 16th Coastal Eng. Conf., 1978
- 4) Gerritsen, F.：Wave attenuation and wave set-up on a coastal reef, Proc. 17th coastal Eng. Conf., 1980
- 5) Lamb, H.：Hydrodynamics, 1932
- 6) Le Mehaute, B.：Periodical gravity wave on a discontinuity, Proc. ASCE, Vol. 86, No. HY 9, 1960
- 7) Newman, J. N.：Propagation of water waves over an infinite step, J. Fluid Mech., Vol. 23, part 2, 1965
- 8) Miles, J. W.：Surface-wave scattering matrix for a shelf, J. Fluid Mech., Vol., 28, 1967
- 9) 井島武士・佐々木富雄：潜堤の効果に関する理論的研究，第18回海岸工学講演会論文集，1971
- 10) 日野幹雄・灘岡和夫：共形変換を用いた任意断面地形上の解析法，第30回海岸工学講演会論文集，1983
- 11) 日野幹雄・灘岡和夫：共形変換を用いた任意断面地形上の波動場の解析法—非線形波動の場合—，第31回海岸工学講演会論文集，1984
- 12) 河野二夫・津嘉山正光：リーフによる波の変形に関する研究，土木学会論文報告集，第307号，1981
- 13) 津嘉山正光：半円凸形ステップリーフ上の波の変形特性，昭和58年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集，