

ステップ型リーフ上での波の変形に関する実験的研究

佐藤 道郎*・羽田 好勝**・中江 周作***・吉松 秀雄****

1. ま え が き

海底断面がステップ状になって水深が急に浅くなるリーフに台風時などの高波が作用すると、水深急変部からあまり離れてないところの堤防前面に置かれた消波ブロックは 50 トンもある大きなものでも波で動かされ破損したり飛ばされたりしてかなりの被害を受ける。このような問題にどう対処していくかということは、沖縄や鹿児島島の離島のようにリーフの発達した海岸や港湾を有するところでは重大な問題の一つとなっている。これまで被害が繰返されてきたことから、このようなステップ型のリーフに高波が作用したときの状況が計画や設計の段階で十分に適確に把握されていないことが一つには考えられる。一般に十分な広がりをもったリーフは天然の潜堤として高波のエネルギーを減殺するが、上述のようなところでは沖からあまり減衰せずに来た波は水深急変部に衝突して水位をかなり上昇させてリーフ上に乗り上げるので、比較的短い距離で急速に波高は減少していくものの一般の傾斜海浜の同じ水深のところに比べたらはるかに波高の大きな波が作用する。

基本的には断面急変部での波の変形の問題であり、これまでに理論はもとより幾多の研究がされてきている。だが、現実にはリーフ上の水深よりも大きな波高の波が作用してリーフ上で砕けながら変形していく、あまり理論とはなじまないと思われるような状況で問題が生じており、しかも、リーフ上に堤防が設置されているとリーフ上に堆積した水で水位は上昇し、ひいては波も影響を受けることが考えられる。

本研究は、鹿児島県の沖永良部島の和泊港や知名漁港で生じた消波ブロックの破損、流失に関する模型実験を契機に、ステップ型のリーフに高波が作用する場合のリーフ先端からあまり離れて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よいかという問題に対して目安を得ることを目的として行った実験結果をまとめたものである。

のである。

2. 実験装置と実験方法

長さ 30 m、幅 1 m、高さ 1.2 m の造波水路に 図-1 に示すような断面の鋼製のリーフ模型を設置した。これは沖永良部島の和泊港の 1/41 の模型として作ったものを用いた。

造波装置から少し離れたところに容量式波高計を設置して入射波の水位を測定するとともに、リーフ上での水位を水路側面よりビデオカメラで撮影録画した。その際、0.1 秒刻みのカウンターを作って写し込み、後により 0.1 秒毎の水面をテレビ画面から読みとった。それをもとにリーフ上の各点での水位の時系列データや、波高、平均水位を得た。

実験はまずリーフ上に堤防の無い場合について、リーフ上の静水深 0, 5, 10 cm として行い、さらに、リーフ上に堤防を設置して行った。堤防は設置位置をリーフ先端から 60, 120 cm の 2 種類、天端高を 9, 18 cm の 2 種類について実験した。このときは静水深を 5 cm としている。

実験波は周期 1.0~2.6 秒、波高 10~16 cm の範囲の規則波であり、波高と周期のさまざまな組合せで多数について行った。本研究で対象としたのはリーフ上の水深よりも大きな波高の波で、峰のときにはリーフ先端で砕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に流れおちていくような状況を呈する場合のものである (図-2)。

計測の対象としたのは波高が一定となってから、再反射の影響が現われるまでの数波である。

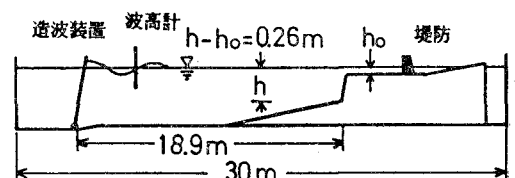


図-1 実験装置の概要

* 正 員 工博 鹿児島大学助教授 工学部海洋土木開発工学科

** 学生員 鹿児島大学大学院工学研究科

*** 東光コンサルタンツ

**** 三井共同建設コンサルタント

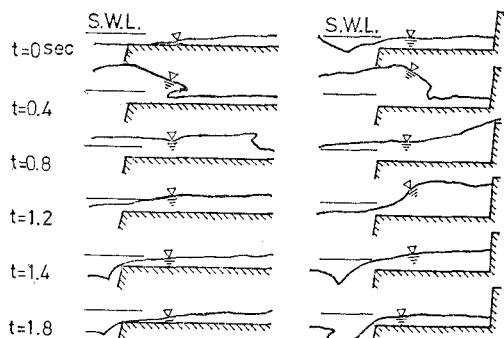


図-2 リーフ上での水面形の変化の例

3. 実験結果と考察

3.1 堤防の無い場合

(1) 波高の変化

リーフ上での波高 H のリーフ先端からの距離 x に伴う変化を調べてみると、波形勾配 H'_0/L_0 がある程度大きくて相対水深 h/L_0 が小さく、リーフ上で碎波するような場合には、沖波波高 H'_0 で H , x ともに無次元化するとリーフ上の水深 h_0 によって異なるが H'_0/L_0 や h/L_0 にあまり関係せず似たような変化の様相を示すようになる(図-3)。 H'_0 は換算沖波波高, L_0 は沖波波長である。

(2) 平均水位の変化

リーフ上に波が打ちあげると、岸側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となった。だが、このときには造波板による再反射の影響が現われてくる。そこで、本実験では再反射の影響も水位の上昇もそれ程顕著でない 3~4 波目の波や水位を特に対象としている。礁原が十分に広く、高波は数波続くもののその後には小さな波が続くといった実際によく見られる状況を想定すれば、それでもよいだろうという考えと、実験上やむを得ない事情によるものである。そのようにして得られた平均水位の状況を示す例を 図-4、図-5 に示した。図-4 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数波ではそれ程の水位上昇は考えなくてもよいと思われる。リーフ上で碎けた波の突っ込み点付近で平均水位は幾分低下している。また、岸よりで水位の上昇が見られるが、前述のようにここに示されているよりも岸側からの水位の上昇の影響が現われたものである。図-5 で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なかった。

(3) リーフ上の波高変化の概算

図-3 に示されたようなリーフ上での波高の変化につ

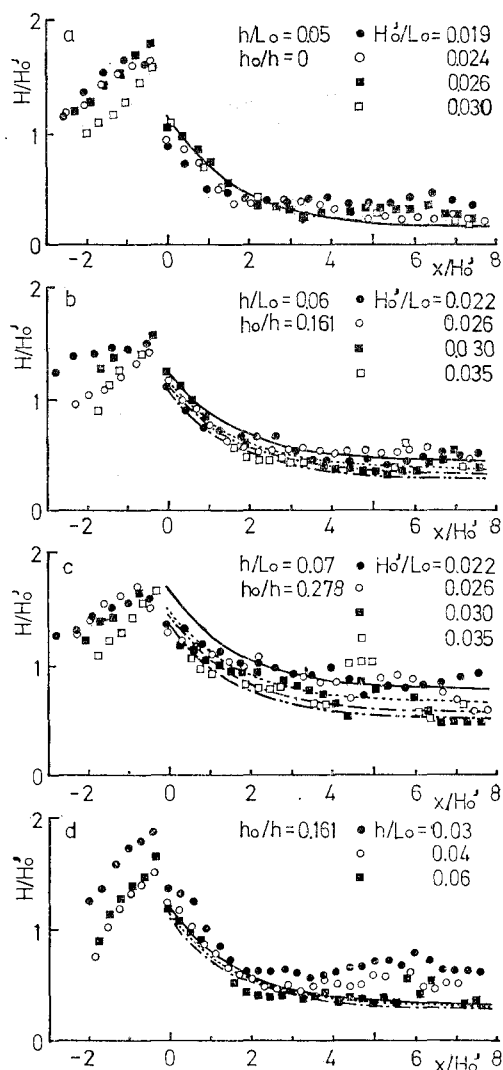


図-3 波高変化の実験結果と計算値の例 (●: —, ○: ---, ■: - · - ·, □: - · - · - · が対応)

いての細かい物理的な議論ができるところまで至ってないので、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。大雑把に見ると H/H'_0 と x/H'_0 の間に次のような関係を想定できそうである(図-6)。

$$\frac{H}{H'_0} = A + B \exp\left(-C \frac{x}{H'_0}\right) \quad \text{.....(1)}$$

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んで、ほぼ一定になってきたときの波高 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念頭において次で近似してみる(図-6)。

$$A = \frac{3}{4} \cdot \frac{h_0 + \Delta h}{H'_0} \quad \text{.....(2)}$$

一方、(1) 式で $x=0$ とおいたときの波高を H_+ と表す

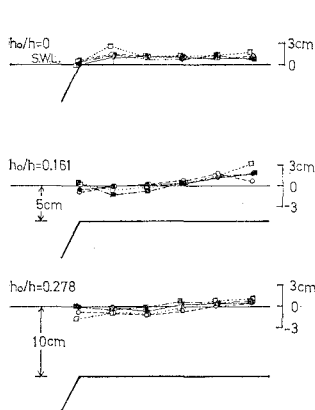


図-4 平均水位

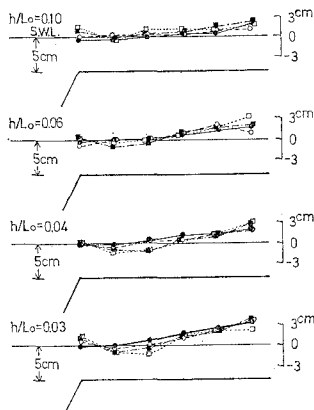


図-5 平均水位

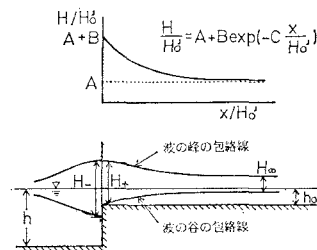


図-6 波高変化のモデル

と、本研究で対象としたリーフ先端で谷の位相の時に海側の波高 H_- と不連続となるような状況の下では、近似的に $H_+ = H_-/2 + h_0$ とおける、また (1) 式より、 $H_+ = (A+B)H_0'$ であるから B は次のように表される。

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

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、 $H_- = (1+K_r)K_s H_0'$ と表せる。 C については実験で得られた波高変化から非線形回帰分析によって求め、種々のパラメーターとの関連を検討したが、あまりはっきりした関連はつかめておらず平均値は 0.57 で標準偏差 0.31 とかなりバラツいた値となっていた。そこで、ここでは $C=0.6$ とした。その結果、次のようなリーフ上での波高変化の概算式が得られた。

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

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¹⁾を用いて計算した結果の例が図-3の中に示されている。また、 A 、 B として想定した (2)、(3) 式と実験値との対応は図-7に示されている。計算にあたって $\Delta h/H_0'$ は図-4、5を参考にして 0.1 としている。

また、ある程度水深があって $H_+ = H_-$ とおけるもののリーフ上で碎けて減衰していく、という場合については $B = (1+K_r)K_s - A$ とおけるので次のようになる。

$$\frac{H}{H_0'} = \frac{3}{4} \cdot \frac{h_0 + \Delta h}{H_0'} + \left\{ (1+K_r) K_s - \frac{3}{4} \cdot \frac{h_0 + \Delta h}{H_0'} \right\} \exp \left(-0.6 \frac{x}{H_0'} \right) \dots\dots (5)$$

3.2 堤防を設置した場合

(1) 波高変化

リーフ上に堤防を設置した場合には、堤防での反射、

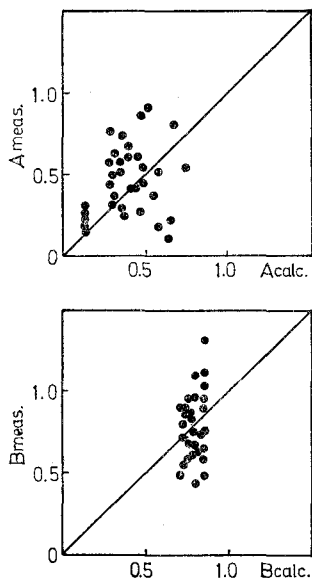


図-7 A, B の実験値との比較

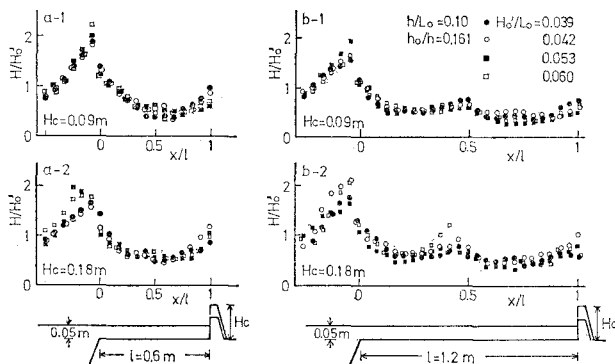


図-8 リーフ上に堤防があるときの波高変化の測定例

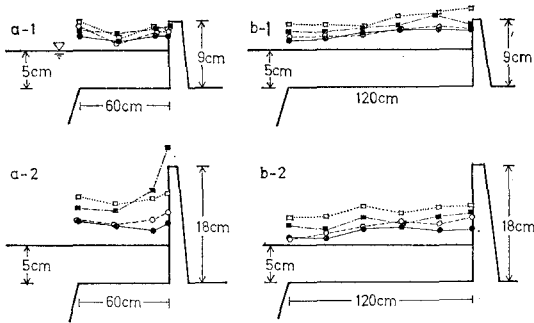


図-9 リーフ上に堤防があるときの平均水位の測定例

後続波と反射波との衝突・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。そこで、この場合にはリーフ先端から堤防に至る区間内での相対的な位置による波高分布として実験結果の例を図-8に示した。(a-1), (a-2) は図-3 でいうと x/H_0 がほぼ 3~5 程度のところに堤防が設置された場合のもので、(b-1), (b-2) はその2倍離れたところに堤防を設置した場合の結果の例である。(a-1), (b-1) は堤防の天端高の低い場合で、(a-2), (b-2) は高い場合のものである。

堤防までの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。水位の不連続部の両側でそれぞれ一定な水深と流速を有する場合について、固体壁での段波の反射によってかなりの波高増大の生じることが知られている²⁾。リーフ上での波の波長に比べて堤防までの距離がかなり短い場合にはその場合と状況は似ており、実際には越波が生じるので堤防天端高よりもはるかに水位が高くなるということはないものの、堤防天端高を高くすればしたなりに水位も高くなる。そして、堤防天端高の高い程、強い戻り流れによって、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の波長の半分以上になると、リーフ上で波高を幾分減じながら堤防に衝突して反射するが、その反射波はリーフ上で堤防に向かう後続波と衝突するようになる。そして、その地点では局部的に波高が高くなる(図-8の(b-1), (b-2))。

大まかな議論であるが、 $t=0$ でリーフ先端から堤防に向かって ξ_+ の速度で進む波が堤防で反射して ξ_- の速度で戻ってくる場合、後続する波とは図-10 で示すように

$$0 < x = l - \frac{nT}{\left(\frac{1}{\xi_+} - \frac{1}{\xi_-}\right)} < l \quad (n=1, 2, \dots)$$

のところで衝突することとなる。 l はリーフの先端から堤防までの距離である。本実験の場合には短周期波であり、打ちあげてから波高が減少しながら進んだ後に堤防に衝突して反射するものの越流するので完全反射に比べ

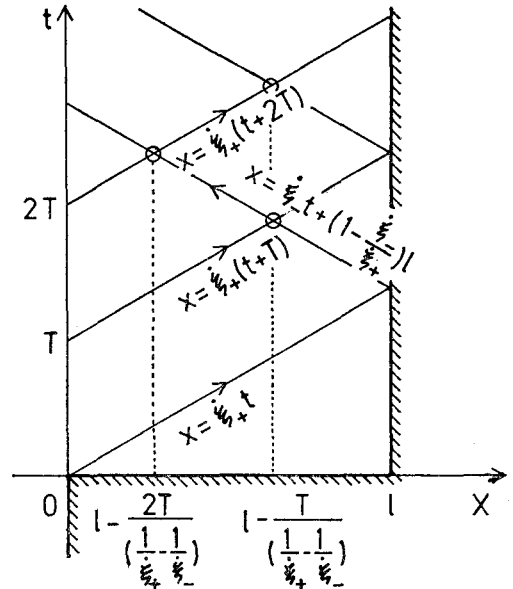


図-10 リーフ上での入射波と反射波の衝突

てかなり波高も小さい。したがって、一定波高の段波が完全反射する場合とは状況が少し異なるであろうが、大まかに見積ってみると

$$\xi_+ = \sqrt{gh_1} \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 + \frac{h_1}{h_0}\right)}$$

$$\xi_- = -\sqrt{gh_1} \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 + \frac{h_1}{h_2}\right)}$$

において、 h_1 として静水深に図-9 に示したような平均水位の上昇量を加えたものを考え、 h_0 としては h_1 からリーフ上の波高の半分を引いたもの、 h_2 としては h_1 に半波高を加えたものを用いてみると、図-8, 図-9 に示した例については、リーフ先端より 46~54 cm となり、実測では 45~60 cm と対応している。これはリーフ上の波長 L を $T\sqrt{gh_1}$ として計算して、堤防から $L/2$ だけとったものよりも1割強程度海側に寄ったところである。しかし、おおよそ堤防からリーフ上の波長の半分毎のところで入射波と反射波が衝突すると考えておいてよいであろう。

波高をどの程度に見積ればよいかという点に関しては堤防が無い場合に比べて堤防の位置や天端高などの要素が入ってきて複雑となり定量的に評価し得る方法を述べるところまでは至ってないが、今のところのデータからは、堤防のところで入射波・反射波の重合するところで堤防の無い場合に想定される低減した波高の2倍程度を考えればよいと思われる。ただ、この場合、後述のように平均水位がかなり上昇することになるため、峰の水位そのものは堤防の無い場合に比べてはるかに高いものとなる。

(2) 平均水位

図—9 に実験例を示したようにリーフ先端からあまり離れてないところに堤防を設けると数波の波でかなりの水位上昇が見られる。堤防天端高が低い場合は越流によって、波高が大きくなっても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程水位が上昇する。打ちあ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わけだが、本実験でそのような平衡状態に達してるのかどうかは分らない。

4. あとがき

水深が急に浅くなるようなリーフに高波が作用する場合にリーフ上でどんな波の変形が生じるか実験的に調べた結果のあらましについて述べてきた。

リーフ前面がある程度の水深があると斜面の場合や、斜面部分を経て礁原に至るようなリーフの場合と異って

かなりの高波がリーフ上に乗りあげる。ある程度の距離を進むとそれは減衰してしまうが、リーフ先端からあまり離れてないところではかなりの波が作用することとなり、堤防が設けられていると堤防の高さと入射波の高さに応じてかなり水位が高くなることが示された。このような状況でのブロックの挙動やブロックを設置することの可否等を検討していく上で流れやそれに伴う流体力を調べていくのが今後の課題と思われる。

実験を行うにあたって、本学技官 中村和夫氏の助力を得たことを記し謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 井島武士：最近の波浪理論における境界値問題の解法とその応用，1971 年度水工学に関する夏期研修会講義集，Bコース，pp. B-1~14, 1971.
- 2) Stoker, J. J.: Water Waves, pp. 326~333, Interscience Publishers, Inc., 1957.