

リーフ通過波の変形特性

津 嘉 山 正 光*

1. 緒 言

沖縄諸島の海岸に広く分布するリーフ上の波の変形に関し、筆者らはこれまで主として波の通過率・反射率の面から検討してきた^{1),2)}。理論的にはいわゆるポテンシャル接続法による解析を行ったが、解析結果は反射率に関しては実験結果と全体的によく合うけれども、通過率は実験値との適合度が悪く、特にリーフ堡礁部の水深が小さい場合は両者は全くちがった分布傾向を示すことがわかった。実験的にはリーフ天端水深が小さいときは碎波やうち込み渦等が生じ、これらが通過波に大きく影響するから上述の不適合はむしろ当然と考えられる。そこで新しい試みとして、運動量方程式を用いた理論解析を行い、このような場合の実験結果もかなりよく説明し得る結果を得た³⁾。

リーフを一種の水底構造物と考えれば、類似の研究として理論的にはステップ形状を対象とした Lamb や Miles, Newman 等の研究^{4)~6)}、矩形潜堤を取扱った Takano・Nakazawa, 井島・佐々木等の研究^{7),8)}があり、実験的には Beach Erosion Board や Johnson・Fuchs・Morison 等の研究⁹⁾がある。ただこれまでの研究は主として波の通過率・反射率を取扱ったものがほとんどで、波形変化について検討したものは例えば Goda・Takeda・Moriya の研究¹⁰⁾があげられるが比較的少ないようである。しかし、このような水底構造物による通過波の変形機構解明のためには波形そのものの変形特性の把握も不可欠と考えられる。

そこで本研究では主としてリーフ通過波の波形に注目し、従来のポテンシャル理論による波形がどの程度実験波形と適合するかという点、および通過波形の変形に対しリーフ堡礁部のパラメータ s , q_1 (図-1) がどのような効果を有するかという点等について検討することにした。

2. 実験装置および実験方法

(1) 実験装置

実験は琉球大学土木工学科の2次元造波水路(断面

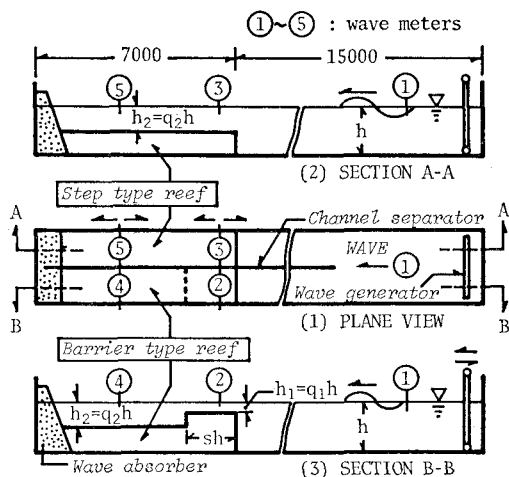


図-1 実験装置概要図

0.8 m $W \times 1.0$ m D , 長さ 22 m, flap-type 造波機付)を用いて行った。実験装置の概要は図-1に示すとおりである。水路を防水合板製の仕切板で二分し、一方にステップ型他方に堡礁型リーフ模型を設置した。模型は銅アングルと防水合板を用いて製作した。なお、波高計測には電気容量式波高計を使用し、波形はこれらの波高計に接続したペンレコーダにより記録した。

(2) 実験方法

各実験ケースにつき、リーフ模型設置後波送りをして図-1の波高計②~⑤をほぼ $L_i/10$ (L_i は入射波長) 間隔に移動させて両リーフ模型上の空間波形を計測し、さらにリーフ先端とリーフ内の点(先端からほぼ一波長の点)における同時時間波形を計測記録した。波高計②と③および④と⑤は各々同一の計測台車にとりつけ、両モデル上の同地点の同時波形が計測できるようにした。入射波は波高計①により各計測中同時計測した。実験に用いたリーフ模型および実験波の諸元は表-1に示す通りである。実験水深 h は全ケースとも 45 cm とした。

3. 理論波形

リーフ上の理論波形は、井島らが透過・不透過斜面上

* 正会員 工修 琉球大学助教授 工学部土木工学科

表-1 リーフ模型および実験波の諸元

Exptmt. Case No.	Reef Model			Wave	
	q_1	q_2	s	T (sec)	H_i (cm)
I-1-1	0.1	0.5	0.2	0.81	4.3~9.5
I-1-2			0.6		3.4~8.4
I-1-3			1.0		3.4~8.4
I-2-1			0.6	1.43	6.5~15.9
I-2-2			1.8		6.1~17.3
I-2-3			3.0		5.1~15.8
I-3-1			1.0	2.16	6.3~21.0
I-3-2			3.0		6.3~21.9
I-3-3			5.0		7.3~21.5
II-1-1	0.3	0.5	0.2	0.81	3.7~8.7
II-1-2			0.6		4.4~9.0
II-1-3			1.0		3.1~8.6
II-2-1			0.6	1.43	6.4~15.6
II-2-2			1.8		6.4~16.0
II-2-3			3.0		6.4~16.4
II-3-1			1.0	2.16	6.0~23.7
II-3-2			3.0		6.0~19.4
II-3-3			5.0		5.9~21.0

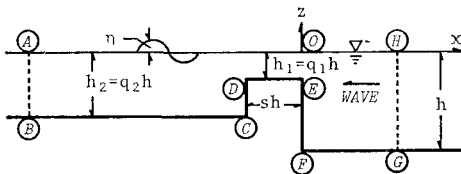
 T : Incident wave period H_i : Incident wave height

図-2 リーフモデルと座標系

の波の変形解析で用いたグリーンの公式による解析法¹¹⁾を応用して求めた。以下にその概要を示す。

図-2 のリーフモデルで座標系を図示のようにとる。非圧縮性完全流体を仮定し、微小振幅波を考えると流体運動は速度ポテンシャル $\Phi(x, z; t) = \phi(x, z) \cdot e^{i\sigma t}$ (σ は波の角振動数) を有する。図-2 の点 ①~⑩を結ぶ閉境界線を D とすると、 D が囲む領域内の各点に対するポテンシャル関数 $\phi(x, z)$ は、グリーンの公式により D 上の点 (ξ, η) における $\phi(\xi, \eta)$ とその点の法線 (ν) 方向の ϕ の導関数 $\partial\phi(\xi, \eta)/\partial(\nu/h)$ で表わされるが、計算点を D 上にとりその点での $\phi(x, z)$ を $\phi(\xi', \eta')$ とすると、 $\phi(\xi', \eta')$ は次式で表示される。

$$\phi(\xi', \eta') = \frac{1}{\pi} \int_D \left[\phi(\xi, \eta) \cdot \frac{\partial}{\partial(\nu/h)} \log(R/h) - \frac{\partial\phi(\xi, \eta)}{\partial(\nu/h)} \cdot \log(R/h) \right] \cdot ds/h \quad (1)$$

ただし、 ds は D に沿う微小長、 R は点 (ξ, η) と (ξ', η') 間の距離で、 h は領域の大きさに関する代表長である。

境界線 D を N 個の微小要素に分割し、各要素の長さを Δs_j 、中央点を (ξ_j, η_j) ; $j=1 \sim N$ とすると式 (1) は次の差分方程式に変換される。

$$\phi(i) = \sum_{j=1}^N [\bar{E}_{ij}\phi(j) - E_{ij}\bar{\phi}(j)] \quad (2)$$

ここで、 $E_{ij} = \int_{\Delta s_j} (1/\pi) \cdot \log(R_{ij}/h) \cdot ds/h$, $\bar{E}_{ij} = \int_{\Delta s_j} (1/\pi) \cdot \partial[\log(R_{ij}/h)]/\partial(\nu/h) \cdot ds/h$, $\bar{\phi}(j) = \partial\phi(j)/\partial(\nu/h)$, $R_{ij} = [(\xi_j - \xi_i)^2 + (\eta_j - \eta_i)^2]^{1/2}$ である。式 (2) は境界 D 上の N 個の点で各々成立し、したがって $\phi(j)$, $\bar{\phi}(j)$ に関する N 個の一次方程式を与える。一方領域境界における力学的・運動学的条件より $\phi(j)$, $\bar{\phi}(j)$ に関する一次の関係式が N 個得られるので、詳細は省略するが、これらを用いれば式 (2) は $\phi(j)$, $\bar{\phi}(j)$ に関する N 元一次連立方程式を構成することになるからこれを解いて境界 D 上の各点の ϕ が決まる。

リーフモデル上の水面形 η は、このようにして得られた ϕ を用いて次式により表わされる。

$$\eta/\eta_0 = -i\phi(x, 0) \cdot e^{i\sigma t} \quad (3)$$

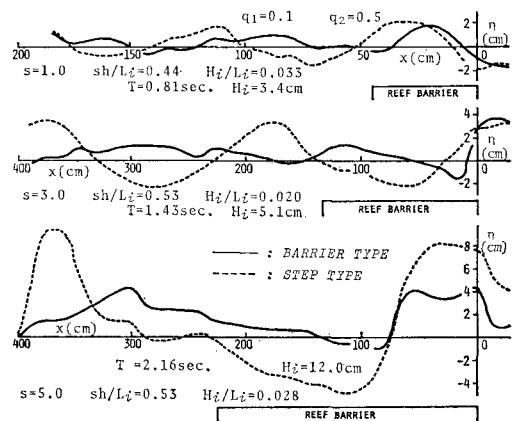
ただし、 η_0 は入射波の振幅、 σ は波の角周波数である。

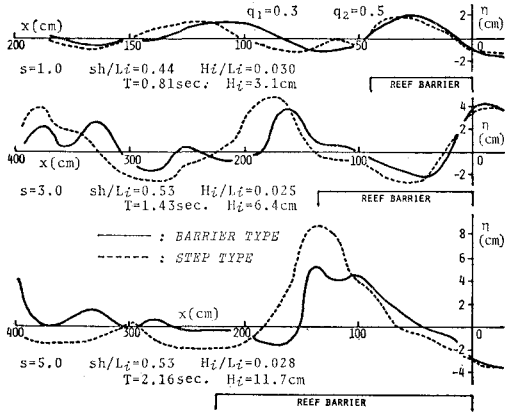
4. 実験結果と考察

実験結果は、主として通過波の波形に注目し、特にリーフ堡礁部の水深 h_1 および天端幅 sh の通過波形に及ぼす効果という観点からとりまとめた。

(1) リーフ通過波の波形と両モデル上の波峰のずれ

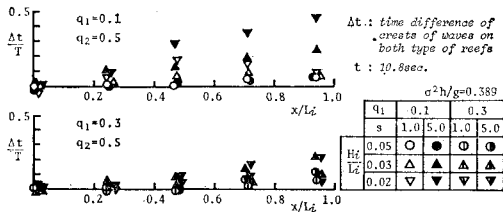
図-3~4 はステップ型と堡礁型リーフモデル上で実測した同時波形の 1 例である。図-3 は $q_1=0.1$ 、図-4 は $q_1=0.3$ の場合であるが、全体的にみるとやはり前者の方が波形変化は大きいように思われる。両モデル間の波形の差異も $q_1=0.1$ のケースが大きく、堡礁部水深

図-3 リーフ通過波の実測波形 ($q_1=0.1$)

図-4 リーフ通過波の実測波形 ($q_1=0.3$)

h_1 の通過波形に対する影響は大きいと言える。また兩リーフモデルにおける通過波の峰のずれも $q_1=0.1$ のケースの方が大きい。これらのことは堡礁部での波速減少や波の分裂・砕波等と関係していると考えられる。また堡礁部先端幅 (sh) に関しては、 sh が大きくなるほど通過波の変形が大きくなる傾向を示し、 q_1 が小さいケースではこの傾向はより強くなる。

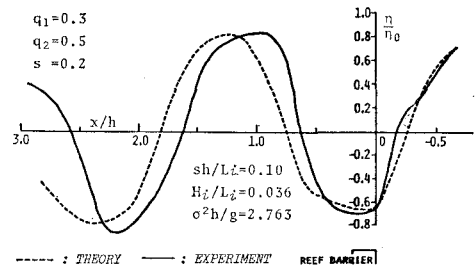
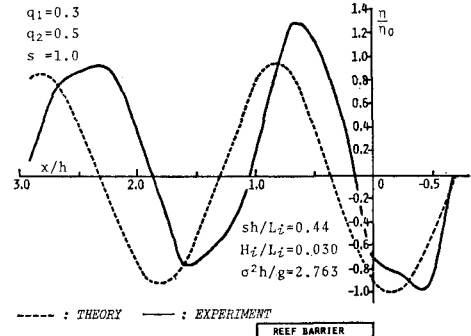
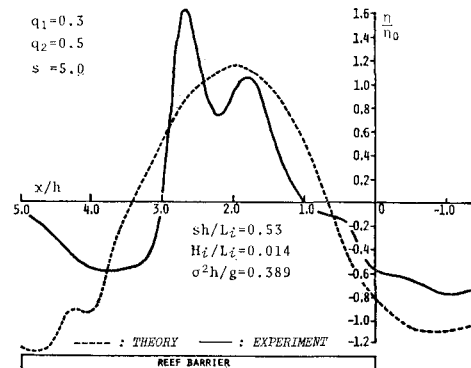
図-5 はステップ型と堡礁型リーフ上の通過波間の波峰のずれ ($\Delta t/T$) と x/L_i の関係を示したものである。 $\Delta t/T$ はリーフ先端からの距離 (x) とともに大きくなる傾向を示している。また同一の x/L_i に対する $\Delta t/T$ は全体的には $q_1=0.1$ のケースの方が大きい。なお、図中の t は入射波が図-1の波高計 ① を通過する時点基準にした経過時間である。

図-5 波峰ずれ ($\Delta t/T$) と x/L_i の関係

(2) 理論波形と実験波形の比較

図-6~8 は理論波形と実測波形の比較図である。図中の理論波形の計算に当っては、図-2の④⑤間の長さを $7h$ にとり、境界線 D の分割要素数 N は 48 とした。したがって式(2)は $\phi, \bar{\phi}$ に関する 48 元連立方程式を与えることになり、その解は電子計算機によって求めた。得られた ϕ を用いて式(3)により波形 η/η_0 を求めたが、時間原点は実験で得られた入射波形の適当な一点で理論波形が一致するようにとった。

図によると $\sigma^2 h/g$ が大きいケースではリーフ先端に近い区間で両波形は比較的良好に一致する傾向を示しているが、 $\sigma^2 h/g$ が小さい場合の適合度はよくない。また $\sigma^2 h/g$

図-6 理論波形と実測波形の比較 ($s=0.2$)図-7 理論波形と実測波形の比較 ($s=1.0$)図-8 理論波形と実測波形の比較 ($s=5.0$)

g が同一のときはパラメータ s の小さいケースの方が一致度はよい。理論波形の適合限界は明確ではないが、 $q_1 > 0.3$ で s が小さいケースで波長の短い波の場合は実験結果と比較的良好に合うと言える。

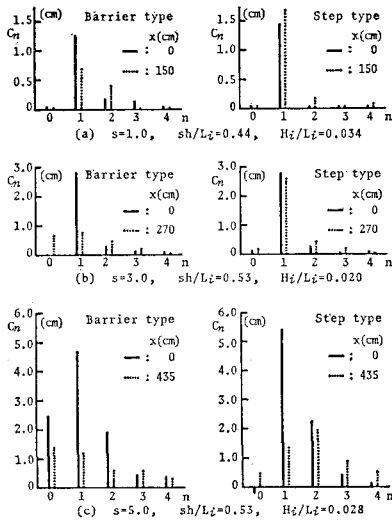
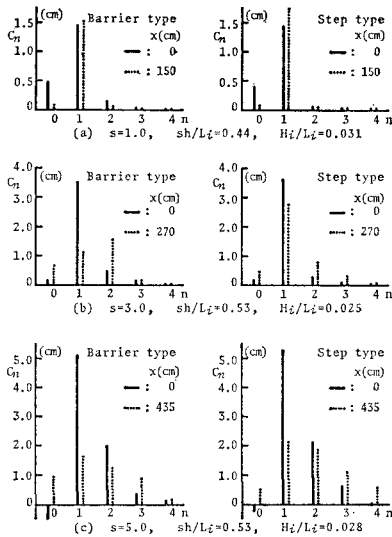
(3) 通過波形のフーリエ分解の結果

リーフ上のある点における時間波形 $\eta(t)$ が調和分解できるとすると次式のように書ける。

$$\eta(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(2n\pi t/T - \phi_n) \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中の係数 C_0, C_n は実測波形のフーリエ分解により得られる。なお ϕ_n は第 n 調和成分波の初期位相である。

本研究では、成分波の組成と寄与状況が場所によってどのように変化するかをみるために、リーフ先端の点と先端からほぼ一波長はなれたリーフ内の点における同時

図-9 リーフ通過波形のフーリエ分解結果 ($q_1=0.1$)図-10 リーフ通過波形のフーリエ分解結果 ($q_1=0.3$)

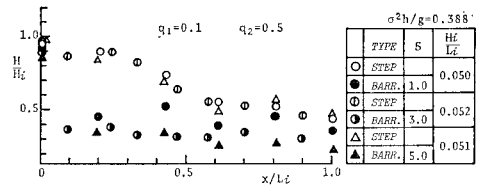
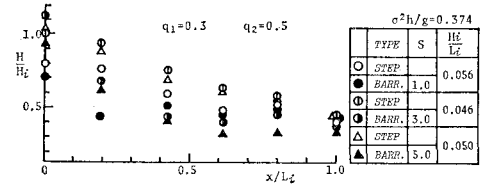
時間波形をフーリエ分解して C_0 , C_n を求めた。

図-9~10 には 図-3~4 に空間波形を示した実験ケースで得られた実測時間波形の分解結果を示した。どのケースも基本周波数の波が卓越しているが、 $s=5.0$ の場合は倍周波数成分波の寄与も大きくなる。またリーフ内点の波形はリーフ先端点の波形に比べて倍周波数以上の高周波数成分波の寄与の割合が大きくなっている。

なお、リーフ上の2点の同時波形のフーリエ分解結果を用いて各成分波の位相速度が求められ、線形理論による波速との比較も試みたが、まだ十分な検討ができていないのでこれについては別の機会に報告したい。

(4) リーフ上の波高分布

図-11~12 はリーフ上の波高分布を示したものである。 H/H_i は x/L_i の増加とともに次第に減少していく

図-11 波高比 (H/H_i) と x/L_i の関係 ($q_1=0.1$)図-12 波高比 (H/H_i) と x/L_i の関係 ($q_1=0.3$)

が、減少の度合は $x/L_i < 0.5$ の区間で大きい。図示のケースでは q_1 が小さく s が大きいほど H/H_i は小さくなっており、リーフ通過波の減衰に対しては堡礁部の水深とともに天端幅の影響も大きいことを示している。

5. 結 語

主な結論をまとめて示すと次のようになる。

- (1) 堡礁型リーフ通過波の波形は、堡礁部の天端水深 (q_1h) と天端幅 (sh) の影響を強くうけ、 q_1 が小さく s が大の時、ステップ型リーフ通過波に比し変形が大きい。
- (2) ポテンシャル理論による波形は、堡礁部水深 (q_1h) が大でかつ天端幅 (sh) が小のとき、 $\sigma^2 h/g$ の大きい波については実測波形との適合度がよい。
- (3) リーフ通過波形のフーリエ分解結果は、リーフ先端およびリーフ内の点とともに基本周波数成分波が卓越するが、 q_1 が小さくかつ s が大きくなると倍周波数以上の高周波数成分波の寄与の割合が増す傾向を示す。
- (4) リーフ上の波高はリーフ先端からの距離が増すとつれて減少するが、 $x/L_i < 0.5$ の範囲での減衰度が大きい。また波高減衰の度合は、同一波形勾配の波のときは q_1 が小さくかつ s が大きいほど大きい。

終りに、本研究に際して御教示を賜った琉球大学工学部の河野二夫教授に感謝申し上げるとともに、実験・データ整理等で助力いただいた当時琉球大学工学部4年生の小橋川透・高江洲広美の両君に対し謝意を表する。なお、数値計算は琉球大学計算センターの計算機 FACOM 230-35 によった事を付記し関係各位にお礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 河野二夫・津嘉山正光・筒井茂明：堡礁状 Reef による波の反射率と通過率，琉球大学理工学部紀要，工学篇 12 号，pp. 167~188, 1976.
- 2) 津嘉山正光：Barrier-Reef による波の変形，琉球大学理

- 工学部紀要, 工学篇 12 号, pp. 189~198, 1976.
- 3) 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, pp. 27~38, 1981.
 - 4) Lamb, H.: *Hydrodynamics*, 6th Ed., Cambridge University Press, pp. 262~293, 1932.
 - 5) Miles, J. W.: Surface-wave scattering matrix for a shelf, *Jour. Fluid Mech.*, Vol. 28, pp. 755~767, 1967.
 - 6) Newman, J. N.: Propagation of water waves over an infinite step, *Jour. Fluid Mech.*, Vol. 23, pp. 399~415, 1965.
 - 7) Takano, K. and H. Nakazawa: Effect dun obstacle de parallélepède rectangle sur la propagation de la houle, *Jour. Oceanograph. Soc. of Japan*, Vol. 22, No. 5, pp. 183~191, 1966.
 - 8) 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 海講論文集, pp. 141~147, 1971.
 - 9) Johnson, J. W., R. A. Fuchs and J. R. Morison: The damping action of submerged breakwaters, *Trans. AGU*, Vol. 32, No. 5, pp. 704~718, 1951.
 - 10) Goda, Y., H. Takeda and Y. Morita: Laboratory investigation on wave transmission over breakwaters, *Rep. of Port and Harbour Research Institute*, Rep. No. 13, pp. 4~38, 1967.
 - 11) 井島武士・周 宗仁・吉田明德: グリーンの公式による有限水深の波の 2 次元境界値問題の解法, 九大工学集報, 第 48 巻 6 号, pp. 767~774, 1975.
-