

半円凹形ステップ状リーフによる波の変形

津 嘉 山 正 光*

1. 緒 言

リーフ上を通過する波の変形問題に関し、筆者らはこれまでその代表形状である堡礁型およびステップ型リーフモデルを対象に、2次元問題として実験的・理論的研究をすすめてきた^{1)~4)}。また、実験結果の現地適合性についても若干の検討を試みた⁵⁾。理論的取扱いについては当初はいわゆるポテンシャル接続法、ついで運動量方程式を用いた解析法により主として波の通過率・反射率の理論値を求めたが、特に通過率に関しては後者による解析結果の方が実験値との適合度がよいという結果となった⁴⁾。

本研究の目的は、これまでの2次元リーフを対象にした取扱いを3次元のリーフの場合に拡張していくことにある。沖縄諸島のリーフの実際の形状は、断面および平面形状ともに複雑な形をなしており⁶⁾、3次元リーフモデルの断面および平面形状をどのようにするかが問題となる。ここでは現地リーフを巨視的にみた場合の形状特性や解析的取扱いの便宜等を考慮して、平面形状が半円凹形のステップ形リーフ(図-1)を用いることにした。

リーフのような不連続海底や水中構造物による波の変形問題を取扱った研究はモデルが2次元の場合については比較的多く、例えばステップ型海底を対象としたLamb や Miles, Newman 等の研究^{7)~9)}、矩形潜堤を取扱った Takano・Nakazawa, 井島・佐々木等の研究^{10), 11)}がある。しかし3次元モデルのケースについては比較的研究例が少ないようである。

本論文は図-1に示す3次元のリーフによる波の変形問題に関して行なった実験結果につき、主として通過波の波形やリーフ上の波高分布等に注目してとりまとめたものであるが、これまで2次元リーフモデルに対して用いた運動量方程式を応用した解析法を本ケースの3次元リーフに拡張適用することも試み、若干の数値計算結果を実験値とともに示した。

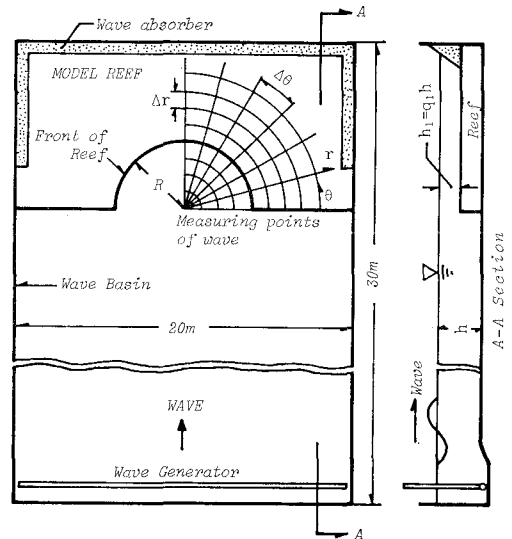


図-1 実験装置概要図

2. 実験装置および実験方法

(1) 実験装置

実験には琉球大学工学部土木工学科の平面造波水槽(20mW×30mL×0.6mD, フラップ型造波機付)を用いた。実験装置の概要は図-1に示すとおりである。リーフモデルは防水合板と角材を用いて製作した。なお、リーフ円形部の半径Rは4mとした。波高計測には電気容量式波高計を用い、ペン書きレコーダに接続して波形記録をとった。

(2) 実験方法

実験方法は、各実験ケースにつき水位設定後造波して図-1に示す各計測点における波形を記録計測するものである。4台の波高計を同時使用したが、1台は常時造波板の前面4mの点に定置して入射波の計測にあて、他の3台を図-1の各計測点に順次移動設置して波の計測を行なった。波高計を移動するときは一旦波送りを中止し、移動定置後改めて造波して計測するようにした。図-1の計測点メッシュは $\Delta r=1\text{m}$ 、 $\Delta\theta=15^\circ$ とした。なお、波の峰線変化やリーフ先端部での現象については目視による観察を行なうと同時に写真撮影を行なった。

* 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

Case No.	q_1	T (sec)	H_i (cm)	H_i/L	kh	$\frac{h}{L}$ (cm)
I-1-(1~3)	0.1	0.84	3.4~10.9	0.03~0.10	2.06	35.0
I-2-(1~3)		1.20	4.3~11.7	0.02~0.06	1.18	
I-3-(1~3)		1.63	4.3~11.3	0.02~0.04	0.80	
I-4-(1~3)		2.00	4.0~8.0	0.01~0.02	0.63	
II-1-(1~2)	0.3	0.84	2.9~5.0	0.03~0.05	2.59	45.0
II-2-(1~2)		1.22	2.7~4.6	0.01~0.02	1.39	
II-3-(1~2)		1.67	2.8~6.0	0.01~0.02	0.90	
II-4-(1~2)		2.00	2.1~4.4	0.005~0.01	0.73	

実験で用いたリーフ模型および実験波の諸元は表-1に示すとおりである。

3. 理論的検討

2次元リーフによる波の変形解析に用いた方法⁴⁾を3次元リーフの場合に対し拡張を試みたもので、今後さらに検討していくべき問題点がいくつかあるが、適合の可能性をみるため若干の検討を行なったので以下にその概要を示す。

(1) 基礎方程式

座標系は図-1, 2に示すようにリーフ上については円筒座標 (r, θ, z) , 入射波側については半円部も含めて直交座標 (x, y, z) で表わすことにする。control volume として図-2に示す点①~⑥を通る鉛直面と水表面および水底面で囲まれる領域をとり、エネルギー保存則と運動量定理を適用する。なお、流体は理想流体を仮定し、したがって流体運動はポテンシャルを有する。

まずエネルギー保存則を適用すると次式のようになる。

$$2R(EC_{\theta})_i = 2R(EC_{\theta})_r + (EC_{\theta})_t \cdot r(\theta_2 - \theta_1) + E_t \quad \dots\dots\dots(1)$$

ただし、 E は単位幅一波長当りの波のもつ単位面積当りのエネルギーを示し、 C_{θ} は群速度で添字 i, r, t は各々入射, 反射, 通過波に対応する値であることを示す。 E_t はリーフによるエネルギー損失を示す。 E_t の見積りに日野らの考え方¹²⁾を応用し、 E, C_{θ} にはポテンシャル理論による対応値を用いて(1)による計算をして整理すると次のエネルギー方程式が得られる。

$$1 = K_r^2 + \frac{C_{\theta t}}{C_{\theta i}} \cdot \frac{r(\theta_2 - \theta_1)}{2R} K_{tr}^2 + \frac{8}{9} \cdot \frac{C_{\theta} \delta_i}{n} \cdot \frac{\tanh kh}{(kh)^2(1-q_1)^2}$$

$$\times \left\{ \frac{\sinh kh(1-q_1)}{\sinh kh} \right\}^3 \dots\dots\dots(2)$$

ただし、式中 $K_r = H_r/H_i$, $K_{tr} = H_{tr}/H_i$, $\delta_i = H_i/L_i$ で、 $C_{\theta t}/C_{\theta i} = (\cosh kh/\cosh k'h_1)^2 \cdot (2k'h_1 + \sinh 2k'h_1)/(2kh + \sinh 2kh)$, $n = (1 + 2kh/\sinh 2kh)/2$, C_{θ} は抗力係数を示す、なお、 H_i, H_r は入射および反射波の波高を示し、 H_{tr} は図-1の距離の r 点における通過波高を示す。

同様に図-2の control volume に対し運動量定理を適用すると、詳細は省略するが、結局次の運動量方程式が得られる。

$$\begin{aligned} 1 - K_r^2 - \frac{4n'}{\pi n} R_{a\theta} K_{tr}^2 \\ = \frac{2}{\pi^2 n \delta_i} \{ 2T_{a\theta 1} \sinh k'h_1 \cdot R_{a\theta} \\ - kh \cdot q_1 \cdot R_{c\theta} \} K_{tr} \\ + \frac{8}{\pi^2 \delta_i} \left\{ \frac{kh(1-q_1)}{n} - S_{kh} \right\} K_r \\ + \frac{4}{\pi^2 \delta_i} \left\{ 2S_{kh} + \frac{kh \cdot q_1}{n} \right\} \\ - \frac{1}{\pi^2 n} \left\{ \frac{kh \cdot q_1}{\delta_i} \right\}^2 (2 + R_{c\theta}) - \frac{C_D \cdot S_{h1}}{8S_h} \dots\dots(3) \end{aligned}$$

ここで、 $R_{a\theta} = r(\theta_2 - \theta_1)/R$, $R_{c\theta} = r(\cos \theta_2 - \cos \theta_1)/R$, $S_h = 2kh + \sinh 2kh$, $S_{h1} = 2kh(1-q_1) + \sinh 2kh(1-q_1)$, $n' = (1 + 2k'h_1/\sinh 2k'h_1)$, $S_{kh} = \sinh^2 kh/S_h$, $T_{a\theta 1} = \tanh k'h_1/\tanh kh$ で、他の記号は既述の通りである。

(2) 通過率方程式

式(2), (3)は K_{tr} , K_r に関する連立方程式を形成し、リーフモデルおよび入射波条件が与えられれば各係数は決まる。これら両式より K_r を消して次の通過率方程式が得られる。ただし便宜のため K_{tr} を K と書く。

$$K^4 + a_1 K^3 + a_2 K^2 + a_3 K + a_4 = 0 \quad \dots\dots\dots(4)$$

係数 $a_1 \sim a_4$ は(2), (3)式から K_r を消去する通常計算で得られるものなのでここでは詳細は省略する。リーフモデル及び入射波条件に対応して上式の $a_1 \sim a_4$ が求まり、4次方程式の根として通過率 K が求まることになる。

4. 実験結果と考察

実験結果は主としてリーフ通過前後の波形の変化や通過波の波高分布に注目してとりまとめた。

(1) 通過波の状況と峰線

写真-1, 2はリーフ通過波の状況を示すものである。両方とも $q_1 = 0.1$, $kh = 0.80$ で入射波高のみが異なる。入射波高の小さいケースでは写真-1のように波の峰線はリーフ円形部に対応する部分が弓状に曲って伝播していくが、入射波高が大の時(写真-2)はリーフ先端部で砕波し、通過波はかなり小さくなって段波状にかつ峰線もリーフ形状にほぼ相似の形で伝わっていく。

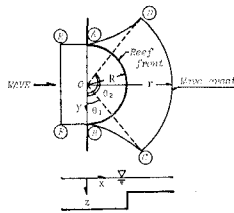


図-2 コントロールボリューム説明図

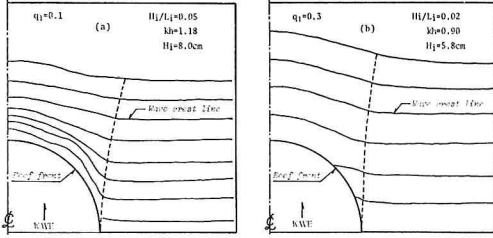
写真-1 リーフ上の波 ($q_1=0.1$, $kh=0.8$, $H_i=4.3$ cm)写真-2 リーフ付近の波 ($q_1=0.1$, $kh=0.8$, $H_i=11.3$ cm)

図-3 波の峰線図

図-3は $q_1=0.1$ および 0.3 の場合のリーフ通過波の峰線図の1例で、スケッチや写真を参考にしながら波形記録から作成したものである。峰線は円形リーフ部背後では弓状または円弧状をなすが、図中に破線で示すその拡がりには q_1 が小さいケースの方が大きくなる。峰線の変形は主として波速のちがいによるものであり、 q_1 が小さいほど波速減少による屈折効果が効いて上述の結果になるものと考えられる。

(2) 半円リーフ部前面の波

リーフ前面では反射波の影響によって重複波が形成されるが、特に半円形前面においては q_1 が小で入射波高の大きいケースのとき、このような合成波による水面擾乱が大となる。写真-2はその顕著な例である。

(3) リーフ通過波の波形変化

図-4には入射波、半円リーフ部前端とリーフ内における記録波形の比較図を示した。図中(a)は入射波、(b)は図-1の $r/R=1.0$ の点、(c)は $r/R=2.0$ の点における記録波形であり、角度 θ は同図-1に示すようにとってある。これらの図からもわかるようにリーフ内伝播波はwave frontが急傾斜となり、波形は r/R が大

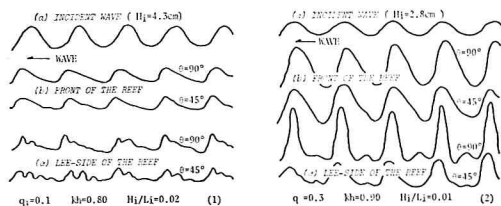


図-4 リーフ通過波の波形比較

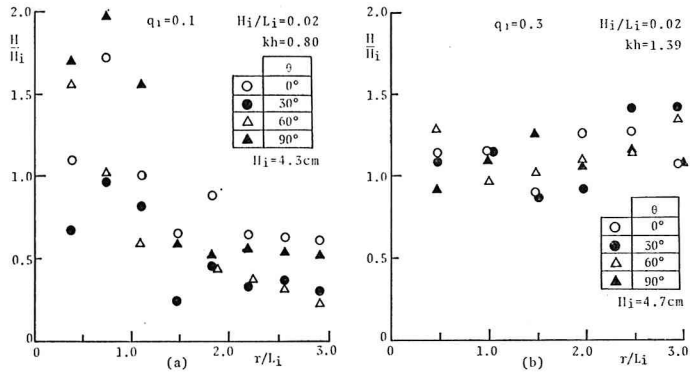
きいとところのものほど複雑となる。なお、 $q_1=0.1$ の場合はほとんどのケースでリーフ先端部で砕波し、その結果生じる擾乱波の影響によってリーフ内波形は $q_1=0.3$ の場合に比べてより複雑な形を示す。

(4) リーフ内の波高分布

リーフ内の波高分布については、波高比 H/H_i と相対距離 r/L_i 、相対水深 kh および波形勾配 H_i/L_i との関係という観点からとりまとめた。ここで H_i , L_i は入射波の波高および波長である。

a) H/H_i と r/L_i の関係

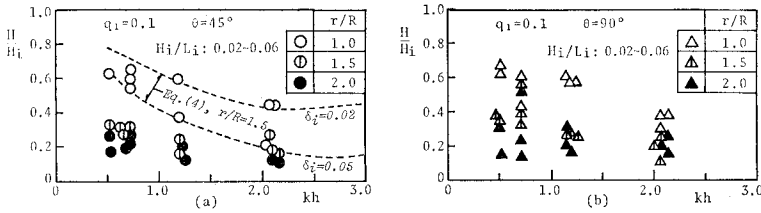
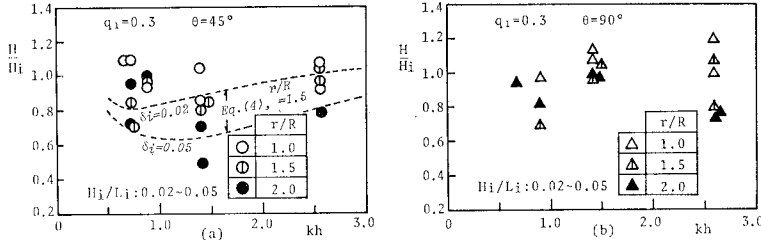
図-5は H/H_i と r/L_i の関係図である。図中の θ は図-1に示す角度である。同図(a)は $q_1=0.1$ の場合であるが、リーフ内($r/L_i > 1.4$)は H/H_i は殆んど 0.5 以下となり、かつ r/L_i の増加とともに漸減する傾向を

図-5 H/H_i と r/L_i の関係

示している。一方リーフ前面($r/L_i < 1.4$)では H/H_i は r/L_i および角度 θ によって大きく変動している。これは既述のようにこのケースでは半円リーフ部前面で重複波が形成されて大きな水面振動が起ることによるものである。同図(b)は $q_1=0.3$ の場合である。リーフ内でも H/H_i はあまり減少せず $1.0 \sim 1.4$ 程度となっている。これはリーフ上での浅水効果による若干の波高増加もあるが、円形リーフ部より屈折進行する波と直線リーフ部よりの直進通過波の合成によるものと考えられる。

b) H/H_i と kh の関係

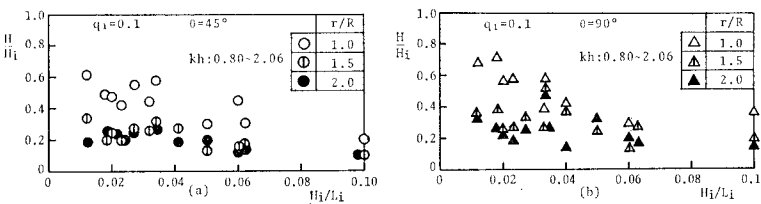
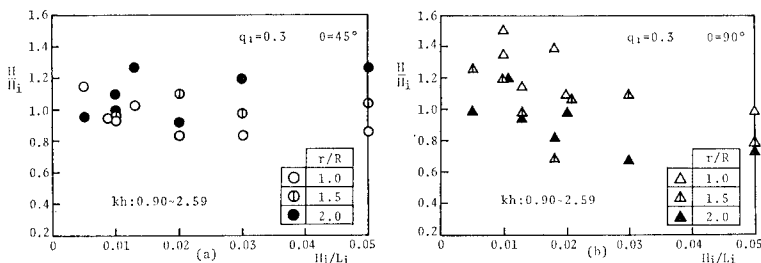
図-6. 7には H/H_i と kh の関係を示した。図-6は $q_1=0.1$ の場合である。全体的には H/H_i は kh の増加と共に減少する傾向を示している。同図(a)は $\theta=45^\circ$ 、(b)は $\theta=90^\circ$ であるが θ による差異は殆んどなく、いずれも r/R が大きい程 H/H_i が小さくなっている。このケースは前述のように殆んどの場合入射波はリーフ先端部で砕波減衰してしまうのでリーフ上の波は θ よりもむしろリーフ端よりの距離(r/R)との関係が大きくなるということであろう。図-7は $q_1=0.3$ の場合

図-6 H/H_i と kh の関係 ($q_1=0.1$)図-7 H/H_i と kh の関係 ($q_1=0.3$)

である。 $q_1=0.1$ 場合と異なり H/H_i に対する kh の影響は r/R によりちがう。 r/R が 1.0 および 1.5 のときは H/H_i は 1.0 付近の値となり、 $r/R=2.0$ のときのみ H/H_i は kh と共に減少する傾向を示している。これは前項 a) でのべた理由によるものと考えられる。なお、図-6 (a), 図-7 (a) には式 (4) より得られる理論値も示してある。全体的傾向としては実験値と合っていると見なされるが、数値的にずれており今後更に検討を要する。

c) H/H_i と H_i/L_i の関係

図-8, 9 は H/H_i と H_i/L_i の関係を示したものである。 $q_1=0.1$ の場合 (図-8) は全般的に H/H_i は H_i/L_i が大きいほど小さくなる。 H/H_i は θ による差異はほとんどないが、 H_i/L_i の小さい範囲では r/R によって異

図-8 H/H_i と H_i/L_i の関係 ($q_1=0.1$)図-9 H/H_i と H_i/L_i の関係 ($q_1=0.3$)

なり、 r/R の大きい点における値の方が小となる。 $q_1=0.3$ の場合 (図-9) は $\theta=45^\circ$ のところでは H/H_i は波形勾配 H_i/L_i による変化はあまりないが、 $\theta=90^\circ$ の各点においては H_i/L_i が大きくなると H/H_i は減少する。 $\theta=45^\circ$ の付近は前述のようにリーフ半円形部よりの屈折進行波と直線部よりの直進通過波の合成域にあたり、その影響で上述の結果になるものと考えられる。

5. 結 語

本論文の主な結論をまとめて示すと次のようになる。

- (1) 図-1 に示すリーフ上を通過する波の峰線は円形部に対応する部分が弓状となるが、リーフ上水深に関するパラメータ q_1 が小のケースの方が曲りが大きくかつその拡がりも大きい。
- (2) リーフ半円部前面水域では、 q_1 が小で入射波高が大きいき反射波と入射波の合成による重複波のため大きな水面擾乱が生ずる。
- (3) 波高比 H/H_i は $q_1=0.1$ の場合はリーフ上ではほとんど 0.5 以下に減衰し、かつ相対距離 r/L_i の増加とともに漸減する。しかし $q_1=0.3$ のケースでは H/H_i はあまり減衰せず 1.0~1.4 程度となる。
- (4) $q_1=0.1$ の場合 H/H_i は kh の増加と共に減少するが、 $q_1=0.3$ の場合は $r/R=2.0$ の時のみ同様の傾向となる。式 (4) による理論値は全体的傾向は実験値と合う。

(5) H/H_i と波形勾配 H_i/L_i の関係は、 $q_1=0.1$ の場合は H/H_i は H_i/L_i が大きいほど小さくなり、 θ の影響はあまりない。 $q_1=0.3$ の場合は $\theta=90^\circ$ のところでは上記と同様となるが、そのほかのところでは H/H_i はほとんど減衰しない。

終りに、本研究に関し御教示を賜った当時琉球大学工学部教授の河野二夫博士に感謝申し上げる。また、実験とデータ整理に助力いただいた当時琉球大学工学部 4 年生の折田寿夫・松島 勲の両君並びに数値計算に協力された琉球大学工学部の宇座俊吉技官に対し謝

意を表する。なお、数値計算は琉球大学計算センターの FACOM M-180 II によったことを記し、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) 津嘉山正光：リーフ通過波の変形特性，第 28 回海講論文集，pp. 128~132, 1981.
- 4) 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.
- 5) Kono, T. and S. Tsukayama: Wave transformation on reef and some consideration on its application to field, Coastal Eng. in Japan, Vol. 33, pp. 45~57, 1980.
- 6) 目崎茂和・渡久地健・中村倫子：沖縄諸島のサンゴ礁地形，琉球列島の地質学的研究，第 2 巻，pp. 91~106, 1977.
- 7) Lamb, H.: Hydrodynamics, 6th Ed., Cambridge University Press, pp. 262~263, 1932.
- 8) Miles, J. W.: Surface-wave scattering matrix for a shelf, Jour. Fluid Mech., Vol. 28, pp. 755~767, 1967.
- 9) Newman, J. N.: Propagation of water waves over an infinite step, Jour. Fluid Mech., Vol. 23, pp. 399~415, 1965.
- 10) Takano, K. and H. Nakazawa: Effect dun obstacle de parallélipède rectangle sur la propagation de la houle, Jour. Oceanograph. Soc. of Japan, Vol. 22, pp. 183~191, 1966.
- 11) 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.
- 12) 日野幹雄・山崎丈夫：垂直板による波の反射率・通過率およびエネルギー損失，土木学会論文報告集，109 号，pp. 75~80, 1971.