

半円凹型堡礁状リーフによる波の変形

津 嘉 山 正 光*

1. 結 言

沖縄諸島の海岸の特徴であるリーフ上を通過する波に関しては、その変形機構を含めて工学的に解明すべき問題が多く、筆者もこれまでこの問題と取り組んでいる。

リーフの形状はかなり複雑であるが、筆者は2次元的には代表形状としてステップ状および堡礁状のリーフモデル、3次元的にはこれらの2断面形をもち、平面形状が半円凹形と半円凸形をなすモデルを対象として、主として波の通過率・反射率に関する実験および理論解析による検討を実施した¹⁻³⁾。

本論文は、上述の研究の一つで、図-1に示すように平面形状が半円凹形で堡礁状の断面をもつ3次元リーフ上の波の変形に関し、主に通過波の通過率の分布特性に注目して行なった実験および理論解析結果についてとりまとめたものである。理論解析の手法は、既報の半円凹形ステップ状リーフの場合³⁾と同様運動量方程式を用いるものであるが、その際運動量定理適用の対象となる control volume の境界の一部をなす通過波の孤立峰線の拡がり曲線(図-1のC-C'曲線)については小型平面水槽による実験で求め、理論解析ではその結果を用いてリーフ円弧部通過波の通過率を求めた。

2. 実験装置および実験方法

(1) 実験装置

実験には琉球大学土木工学科の平面造波水槽(20 m W × 30 m L × 0.6 m D, フラップ型造波機付)を用いた。

図-1に実験装置の概要を示すが、リーフモデルは鋼アングルと合板を用いて作成した。図中のリーフ半円部半径 R は 4 m である。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送波して図-1に示す各計測点で波を計測記録するものである。図中の計測点メッシュは $\Delta r = 1$ m, $\Delta \theta = 15^\circ$ とした。波高計は4台を同時使用したが、そのうちの1台は常時入射波計測用にあて、他の3台を順次図-1の各計測点に移動して波

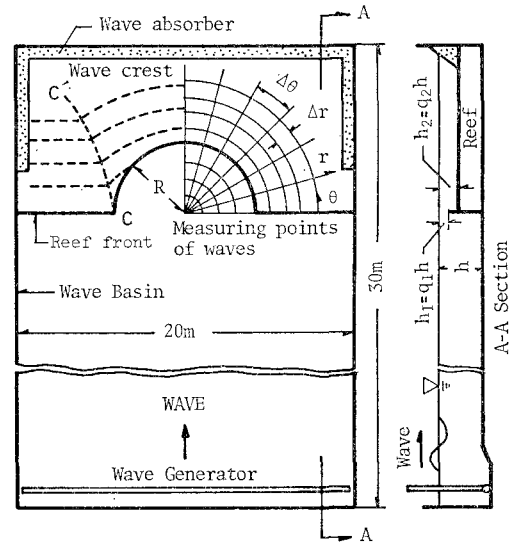


図-1 実験装置概要図

表-1 リーフ模型および実験波の諸元

Case No.	q_1	q_2	$T(\text{sec})$	$H_0(\text{cm})$	H_0/L_0	kh	$h(\text{cm})$
I-1-(1-3)	0.1	0.23	0.8	3.7 ~ 10.7	0.04 ~ 0.10	2.61	41
I-2-(1-3)			1.2	3.6 ~ 10.4	0.02 ~ 0.05	1.32	
I-3-(1-3)			1.6	3.5 ~ 11.7	0.01 ~ 0.04	0.90	
I-4-(1-3)			2.0	3.5 ~ 8.7	0.01 ~ 0.02	0.60	
II-1-(1-3)	0.25	0.39	0.8	2.6 ~ 5.9	0.05 ~ 0.05	3.28	52
II-2-1			1.0	5.8	0.04	2.15	
II-3-(1-2)			1.2	2.8 ~ 8.4	0.01 ~ 0.05	1.58	
II-4-1			1.4	5.2	0.02	1.26	
II-5-(1-2)			1.6	3.3 ~ 5.8	0.01 ~ 0.02	1.05	
II-6-1			1.8	4.9	0.01	0.90	
II-7-(1-2)			2.0	4.0 ~ 7.9	0.01 ~ 0.02	0.79	

の計測を実施した。なお、リーフ通過波の峰線変化やリーフ先端部での現象については目視観察と同時に写真撮影も行なった。表-1には実験で用いたリーフ模型および実験波の諸元を示した。

3. 理論的検討

理論的解析の手法は前述のように既報の半円凹形ステップ状リーフの場合³⁾と同様であるが、基礎方程式誘導の際用いる control volume の境界面を構成するリーフ通過波峰線の拡がり曲線(図-2のB~C, A~D曲線)は後述のように実験的に求めた。

* 正会員 工修 琉球大学助教授 工学部土木工学科

(1) 基礎方程式

流体は理想流体と仮定する。したがって、流体運動はポテンシャルを有することになる。Control volume を

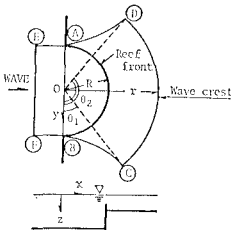


図-2 コントロールボリューム説明図

図-2 のようにとって、まずエネルギー保存則を適用すると、単位幅1波長当りの波のもつ単位面積当りのエネルギーを E 、リーフによるエネルギー損失を E_L 、群速度を C_g とすれば次式が得られる。

$$2R(EC_g)_i = 2R(EC_g)_r + (EC_g)_t \cdot r(\theta_2 - \theta_1) + E_L \quad (1)$$

ただし、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_L の見積りに日野らの考え方⁴⁾を応用し、 E, C_g にはポテンシャル理論による対応値を用いて(1)式を計算して無次元表示をすると次のエネルギー方程式が得られる。

$$1 = K_r^2 + \frac{T_{kh2}}{T_{kh}} \cdot \frac{r(\theta_2 - \theta_1)}{2R} \cdot \frac{n'}{n} K_{tr}^2 + \frac{8}{9} C_D \cdot \frac{\delta_i}{n} \cdot T_{kh} \cdot S_{kh1} + \frac{2\pi}{3} C_D \cdot \frac{\delta_i}{n} \cdot T_{kh2} \left\{ \frac{r(\theta_2 - \theta_1)}{\pi R} \right\}^{3/2} \cdot S_{kh2} \cdot K_{tr}^3 \quad (2)$$

ただし、式中 $K_r = H_r/H_i, K_{tr} = H_{tr}/H_i, T_{kh2} = \tanh k'h_2, T_{kh} = \tanh kh, \delta_i = H_i/L_i, S_{kh1} = (S_{h1}^3 + 3S_{h1})/3 \sinh^3 kh, S_{h1} = \sinh kh(1-q_1), S_{kh2} = (S_{h2}^3 + 3S_{h2})/3 \sinh^3 k'h_2, S_{h2} = \sinh k'h_2(1-q_1/q_2), n = (1 + 2kh/\sinh 2kh)/2, n' = (1 + 2k'h_2/\sinh 2k'h_2)/2$ であり、 C_D は抵抗係数を示す。また、 H_i, H_r, H_{tr} は各々入射波、反射波および図-1の距離 r の円弧峰線上の通過波高を示す。

同様に図-2のcontrol volume に対し運動量定理を適用すると、結局次の運動量方程式が得られる¹⁾。

$$1 - K_r^2 - \left\{ \frac{n'}{n} \cdot \frac{R_{\theta\theta}}{2} + \frac{C_D}{4n} \cdot R_{\theta\theta} \cdot \frac{S_{hp2}}{\sinh 2k'h_2} \right\} K_{tr}^2 = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{T_{kh2} n^2}{n \delta_i} K_r + \frac{4}{\pi^2 n \delta_i} \{ 2k_{12} R_{\theta\theta}^{1/2} - R_{\theta\theta} (T_{kh} + kh_2) \} K_{tr} + \frac{2}{\pi^2 n \delta_i} \left\{ 4T_{kh2} + \frac{(kh_2)^2}{\delta_i} \left(1 - \frac{R_{\theta\theta}}{2} \right) \right\} - \frac{C_D}{3} \cdot \frac{S_{hp1}}{S_{hp}} \quad (3)$$

式中、 $R_{\theta\theta} = r(\cos \theta_1 - \cos \theta_2)/R, R_{\theta\theta} = (\theta_2 - \theta_1)/\pi R, T_{kh2} = T_{kh} + kh_1, T_{kh2} = kh(2-q_1) - T_{kh}, S_{hp2} = \sinh ka_1 + ka_1, ka_1 = 2kh(1-q_1), S_{hp} = \sinh 2kh + 2kh, S_{hp2} = \sinh ka_2 + ka_2, ka_2 = 2k'h_2(1-q_1/q_2)$ であり、他の記号は式(2)と同じである。なお、 k, k' は各々図-1に示す水深 h, h_2 領域における波数である。

(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するので、両式より K_r を消去すると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_t と書く。

$$K_t^6 + a_1 K_t^5 + a_2 K_t^4 + a_3 K_t^3 + a_4 K_t^2 + a_5 K_t + a_6 = 0 \quad (4)$$

式中の係数 $a_1 \sim a_6$ は式(2), (3)から K_r を消去する通常の計算で得られ、リーフモデルおよび入射波条件により定まる定数である。式(4)は定数係数の K_t に関する6次方程式であり、その根として K_t が求まる。

4. 円弧状峰線の拡がりに対する検討

図-2のcontrol volumeの境界を構成する円弧状峰線の拡がり曲線③~⑤については実験的に検討した。

(1) 実験装置と実験方法

実験に用いた小型平面水槽は図-3に示すようなものである。実験装置の概要は図示のとおりであるが、水槽本体は鋼板製で、リーフモデルは木製である。実験ケースと実験条件は表-2に示した。実験モデルの条件は、基本的には表-1に示す大型平面水槽での実験に準じたが、必要に応じて適当に決めた。

実験方法は各実験ケースにつき、波送りをしてリーフ通過波の峰線の変化状況を図-3の35mm及びビデオカメラで撮影するものである。なお、入射波は同図中の波高計④によって常時計測した。

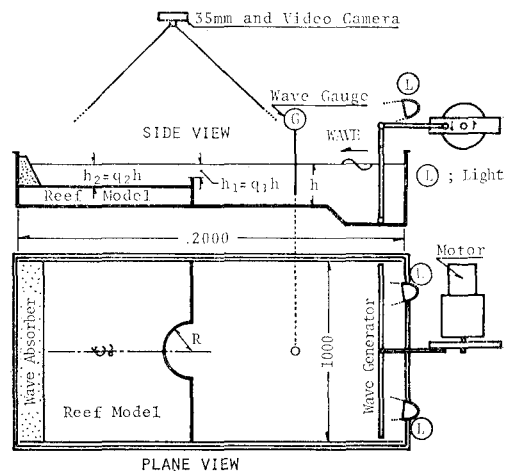


図-3 小型水槽における実験装置概要

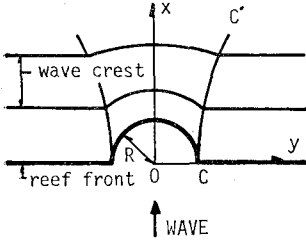


図-4 峰線の拡がり曲線模式図

(2) 峰線の拡がり曲線の実験式

リーフ円弧部通過波の峰線はほぼ円弧状の形を保ちつつしだいに拡がっていく。その拡がり方を定量的に把握するために、図-4 のようにリーフ円弧部中心に原点 0 をもつ xy 座標をとって、実験で得られた 35 mm カメラによる写真とビデオ画像から同図の $C-C'$ 曲線に対応する座標値を読みとって実験曲線を得た。これらの実験値より、最小自乗法によって $C-C'$ 曲線に対する実験式として次式が得られた。

$$y/R = 1 + (-1.04q_1 + 0.87q_2 - 2.46\delta_i - 0.014kh)x/R + 0.082(x/R)^2 \dots\dots\dots(5)$$

式中の記号は既述の通りである。図-5 には式 (5) による計算結果と実験による拡がり曲線の比較図の一例を示した。式 (5) を用いることによって、図-2 に示す control volume の境界 ③~④、④~⑤ が決まり、任意の r に対する円弧角 θ_1, θ_2 も幾何学的関係から求められ、したがって式 (4) の係数 $a_1 \sim a_6$ が算定される。

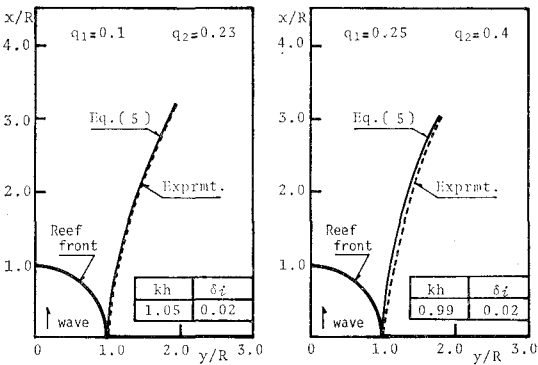


図-5 峰線拡がり曲線の実験値と計算値

5. 結果および考察

(1) 通過率 K_t と相対水深 kh の関係

図-6 は式 (4) および実験で得られた通過率 K_t と相対水深 kh の関係を示す。図中の K_t は図-2 の距離 r の円弧峰線 ③~④ 上の平均値をとってある。

a) リーフ水深比 $q_1=0.1, q_2=0.23$ の場合

図-6 はこの場合の kh に対する K_t の理論値と実験

表-2 小型水槽における実験諸元

Case No.	q_1	q_2	$R(\text{cm})$	$T(\text{sec})$	$H_1(\text{cm})$	H_1/L_1	$h(\text{cm})$	kh
A1-(1~18)	0.1	0.3	10	0.39~1.07	0.5~1.5	0.005~0.048	8.6	0.57~2.31
A2-(1~18)	0.1	0.23		0.38~1.05	0.4~1.2	0.005~0.068	7.8	0.56~2.23
A3-(1~18)	0.25	0.4	7	0.38~1.07	0.6~1.9	0.006~0.070	9.9	0.62~2.78
B1-(1~18)	0.1	0.3		0.39~1.05	0.3~1.1	0.003~0.039	8.6	0.59~2.31
B2-(1~18)	0.1	0.23	7	0.39~1.07	0.3~1.2	0.005~0.036	7.8	0.55~2.13
B3-(1~18)	0.25	0.4		0.38~1.05	0.4~1.6	0.004~0.053	9.9	0.64~2.78

値の分布を、 $r/R=1.0, 1.5, 2.0$ の場合につき示したものである。

理論値 K_t は kh の増大とともに増加し、最大値をとった後漸減する傾向を示している。入射波の波形勾配 δ_i による K_t のちがいは、 kh が小の範囲では比較的顕著であるが、 kh の大きいところではあまりない。相対距離 r/R による K_t の差異も図示のケースではあまりないが、 r/R がさらに大きくなると K_t は小さくなる。これは、 $r/R=2.0$ 程度までは波峰線の拡がりがあり大きくなく、したがって、波峰線拡がりによるエネルギー拡散に伴う波高減衰効果がそれほど大きくないことによるものと思われる。

実験値と理論値の適合度は、 r/R の大きいところでは比較的よいが、リーフ先端 $r/R=1.0$ 付近ではよく合わない。実験では入射波はリーフ先端壁に衝突して波峰がシャープ立上ったのちリーフ内に打ち込み伝播していくので、先端部波高はリーフ内に比べてかなり大きくなる。上述はこのことと関係するものと考えられる。

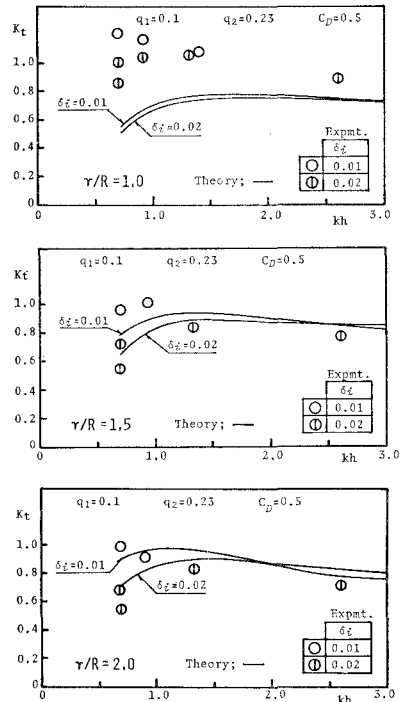


図-6 K_t と kh の関係 ($q_1=0.1, q_2=0.23$)

b) リーフ水深比 $q_1=0.25$, $q_2=0.39$ の場合

図-7 は $q_1=0.25$, $q_2=0.39$ でリーフ天端水深がやや大きいときの K_t と kh の関係図である。 K_t の理論値の分布傾向はほぼ前項 a) の場合と同様だが、最大値は kh の大きい方へ移る傾向を示している。 $r/R=1.0$, 1.5 のところでは、 kh の小さい範囲での実験値とのずれがかなり大きい。これは、リーフ天端水深の増加により、リーフ先端での波峰の尖鋭化による波形の擾乱域が前項 a) の場合に比べて大きくなることによるものと推察される。

(2) 通過率 K_t と相対距離 r/R の関係

a) リーフ水深比 $q_1=0.1$, $q_2=0.23$ の場合

この場合の結果は図-8 に示すが、理論値 K_t はリーフ先端 ($r/R=1$) から r/R の増大につれて漸増して最大となったのち漸減する。 kh が小さいケースほど K_t の最大値は r/R の大きい方へ移動する傾向を示している。以上のことは、リーフ円弧部通過波の峰線長ははじめ減少したのち増大していくので、減少域では一種のエネルギー収束による波高増加が考えられ、このことによるものと思われる。実験値は全体的にリーフ先端で最大となり、相対距離 r/R の増大とともに減少していく。リーフ先端で K_t がかなり大きくなるのは、前述のように入射波がリーフ前面に衝突して波峰が鋭く立上ったのちリーフ内に落ちこむようにして伝播していく現象によるものである。

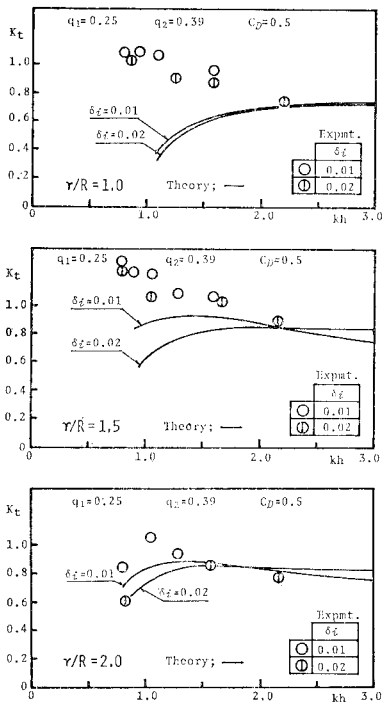


図-7 K_t と kh の関係 ($q_1=0.25$, $q_2=0.39$)

理論値と実験値は、リーフ先端付近を除けば分布傾向は比較的良好に合っていると思われる。定量的には両者は kh の小さいときの差が大きく、特に r/R の小さい範囲でその傾向が強い。これは上述のリーフ先端での波の挙動と関係し、理論の波形のとり方が実験の現象と差がある為と考察されるが、エネルギー伝達量に関しては差はあまり大きくないものと推察され、したがって r/R の大きい領域では一致度はよくなるものと考えられる。

b) リーフ水深比 $q_1=0.25$, $q_2=0.39$ の場合

図-9 がこの場合の図である。理論値の分布傾向は上記 a) とほぼ同様であるが、 K_t 曲線のピークは r/R の大きいところに移っている。実験値の分布傾向もリーフ先端を除けば a) の場合と同様である。リーフ先端部の K_t はこの場合は極端に大きくなることはないが、これは q_1 が大きくなったために先述の波峰の尖鋭化現象が a) の場合程強くないことによるものと考えられる。

理論値と実験値の適合度は a) の場合より全般的によりよいのである。ただ、 kh が小さく、かつ r/R の小さい範囲ではよく合わないが、これは a) で述べたのと同じ理由によるものと考えられる。

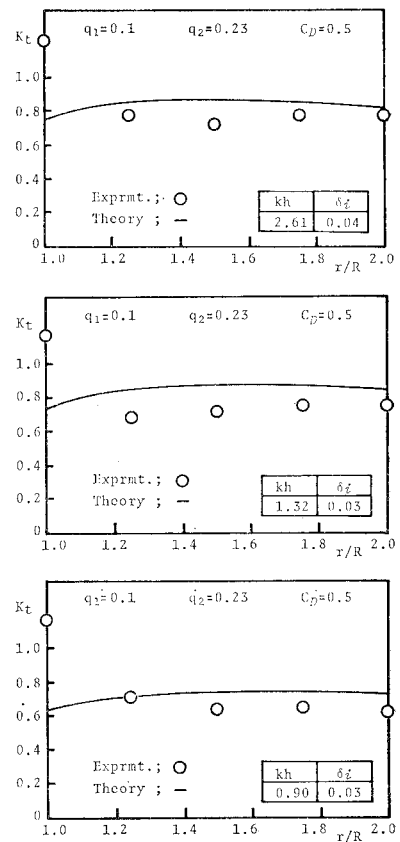
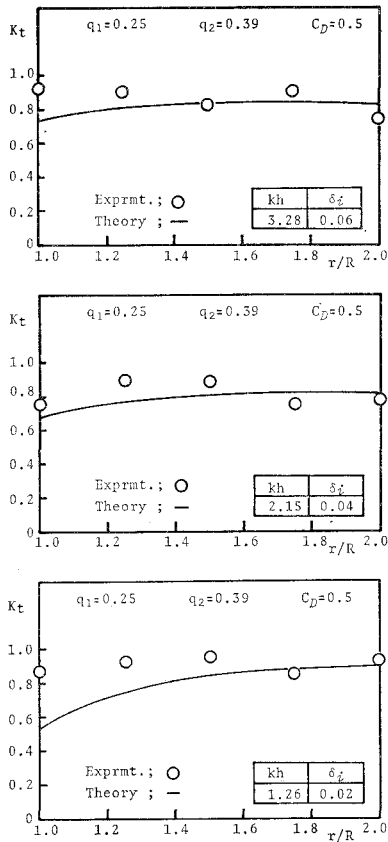


図-8 K_t と r/R の関係 ($q_1=0.1$, $q_2=0.23$)

図-9 K_t と r/R の関係 ($q_1=0.25$, $q_2=0.39$)

6. 結 語

本論文の主な結論は次のようになる。

- (1) 図-1 に示すリーフ上の通過波峰線形状は円弧状

をなすが、その拡がりには式 (5) で近似される。

(2) 通過率 K_t の相対水深 kh に対する理論値分布はピークをもつ山形をなすが、ピーク後の減衰の度合は小さい。また、 kh の小さい範囲を除き、理論曲線は実験値の分布傾向と一致する。

(3) 通過率 K_t の相対距離 r/R に対する理論曲線は、リーフ先端から r/R の増加とともに漸増する弓状をなすが、 K_t の最大点は kh が小さくなると r/R の大きい方向に移る。理論値はリーフ先端付近では実験値とあまりよく合わないが、 r/R が大きいところでは比較的適合度が高い。

終りに、本研究に関し御助言を賜った宮崎大学工学部の河野二夫教授に感謝申し上げる。また、実験とデータ整理に協力された、当時本学学生であった嶺井 薫・喜屋武元秀・比嘉世顕・仲間 修の諸氏並びに数値計算で助力頂いた本学工学部宇座俊吉技官に謝意を表する。なお、数値計算は本学計算センターの FACOM M-180 II によったこと、本研究の一部は文部省科学研究費一般研究 (C) (研究代表者：宮崎大学工学部河野二夫教授) によるものであることを明記し、お礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 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，307 号，pp. 27~38，1981.
- 2) Kōno, T. and S. Stukayama: Wave transformation on reef and some consideration on its application to field, Coastal Eng. in Japan, Vol. 33, pp. 45~57, 1980.
- 3) 津嘉山正光：半円凹形ステップ状リーフによる波の変形，第 29 回海岸工学講演会論文集，pp. 75~79，1982.
- 4) 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.