

リーフにおける波浪変形について

寺尾 健*・長谷川 正**・奥村 研一***・山本 政光****

1. ま え が き

沖縄諸島の海岸は本土の海岸と異なり、その大部分をリーフによって囲まれている。これらリーフは天然の潜堤となって外海からの波を碎波させ、その波高を減衰させる役割を果たしている。一般にリーフ上の水深は浅く、その幅は数百メートルから数キロメートルに及ぶため、リーフによる波浪の変形は他の海浜における浅海での波の変形とは異質の特性を有している。そのため越波や打ち上げ高、波圧などの算定式を適用するに当たっては十分注意する必要がある。

本研究は、沖縄の港湾整備事業および海岸整備事業などに資するため、これまで実施してきたリーフにおける波浪、潮位の現地観測資料および文献等を整理、解析するとともに、現在提案されているリーフにおける波浪の変形の実験式等との照合を行ない、リーフにおける波浪の変形について検討したものである。

2. リーフにおける波浪特性に関する従来の研究

(1) 高山らによる研究¹⁾

高山らは、二次元水路を用いて不規則波による模型実験(縮尺 1/5)を行ない、リーフ内外の波高、周期、スペクトルの変化、リーフ上の水位変化等を整理している。さらに、これらをもとに波高変化、平均水位の上昇量を算定する実験式を提案している。

(2) 河野らによる研究²⁾

河野らは、沖縄本島部瀬名海岸で波浪観測を実施し、高山らと同様の整理を行なうとともに、波高変化の算定式を提案している。これはリーフによる波の変形を海底摩擦による波高の減衰率 K_f により説明しようとするもので、海底摩擦係数 f は 0.15 程度を用いることとしている。

3. リーフにおける波浪特性(現地観測結果)

本研究の実施に当たって、新たに現地観測を行い波浪、水位のリーフによる変化を調査した(図-1 参照)。これらの方法および結果の概要について以下に示す。

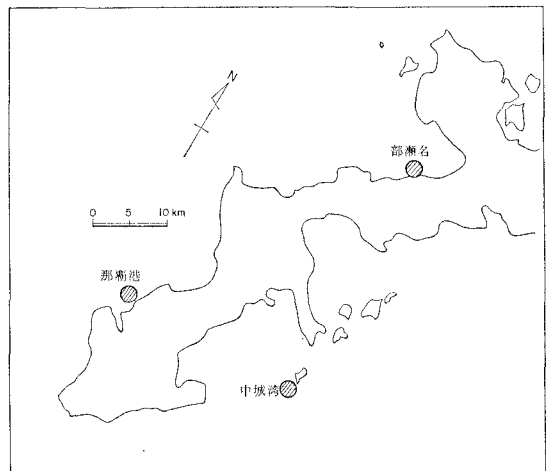


図-1 観測位置図

(1) 現地観測の概要

a) 中城湾(津堅島)における観測

図-2 に観測位置を示す。観測は昭和 51 年から同

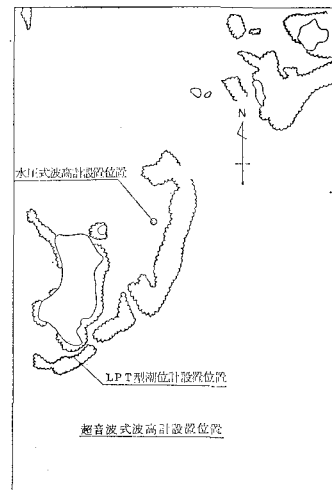


図-2 観測位置図(中城湾)

* 正会員 沖縄総合事務局 開発建設部長

** 沖縄総合事務局 那覇港工事事務所長

*** 正会員 運輸省第一港湾建設局 敦賀港工事事務所次長
(前) 沖縄総合事務局 港湾計画課 建設専門官

**** 新日本気象海洋(株) 気象海象部

53年の3ケ年間実施した。使用計器はリーフ外側が超音波式波高計、リーフ内側は水圧式波高計およびL.P.T.型潮位計とした。なお、リーフ内側の波浪は、各年とも台風期を対象とし観測を実施した。また、リーフ外側は常時観測を実施しており、その結果を利用した。

b) 那覇港（自謝加瀬）における観測

図-3に観測位置を示す。観測は昭和54年4月26日から5月14日の16日間実施した。計器はリーフ外側が超音波式波高計、リーフ内側はスタジア式波高計を使用した。リーフ内側の測点は図のNo. 1~No. 4である。

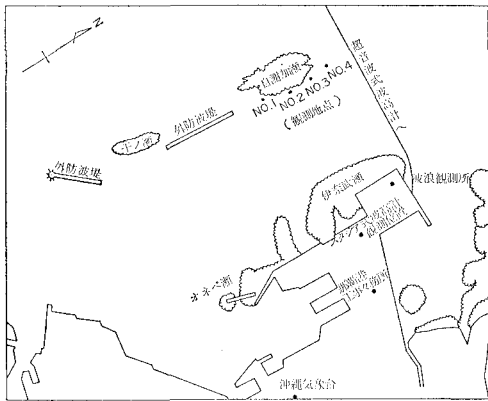


図-3 観測位置図(那覇港)

(2) リーフ上の波の一般的特性

両観測点とも、その取得した波浪は大部分が砕波帯内のものであり、砕波帯外で観測されたものとは著しくその様相が異なっている。

外海からの侵入波は、リーフ外縁で半強制的に砕波され、リーフ上を進行する際、段波状になって進む。水深波長比が0.1以下の状態のときは分裂し、Soliton現象を誘発する。このSoliton現象については、現在までに種々の研究成果が提示されてきているが、その波高の変化特性については未だ十分に解明されているとはいえない。このような波の分裂による変形がリーフ上での波浪の変形を複雑化し、その解明を困難にしている一因ともなっている。今回那覇港波浪観測所に設置されているミリ波レーダーにより自謝加瀬上の波を観測したところ、この波の分裂現象がリーフ上で生じている様子が比較的是っきり認められた。しかし今回の研究の目的はリーフによる波浪の変化を工学的に検討することに主眼を置き、Soliton現象そのものについては深く考察していない。

(3) 波高分布

a) 波高の相対度数分布

不規則性を有する波の性質を波高分布について調べた。一般に波高分布は、スペクトル幅の狭い波の場合に

はレーリー分布になることが多くの研究によって示されているが、今回のように砕波帯内または砕波後の波については波高分布がレーリー分布から大きくずれるものと予想される。今回各測点の波高記録をもとに相対度数分布を求めたところ、リーフ外側の沖合についてはレーリー分布に比較的よく一致しているが、リーフ内側の測点では $H/\bar{H}=1.0$ 前後の波高が多く、レーリー分布からかなりずれていることが確認された。これは、リーフ外側の波の大部分が深海波とみなせるのに対し、リーフ上の波はその波群中の高波高のものが砕波していることを示しており、高山らの実験結果と同じ傾向になっている。一例として中城湾における観測結果を図-4に示す。越波のように波群で考えるべき問題については、以上の点を考慮して設計することが必要であると思われるが、さらに多くのデータの解析を行い、定量的な波高分布の関係を見出す必要がある。

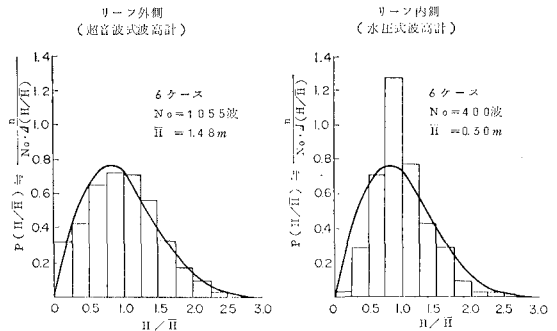


図-4 リーフ内外の波高の相対度数分布(中城湾)

b) 波高間係数

レーリー分布に従う場合には $H_{1/10}$, $H_{1/3}$, $\bar{H}$ 等の間には、理論的な関係が導かれ、その妥当性も観測によって確認されているが、リーフ上の波については、上に述べたようにレーリー分布には一致していない。そこで代表波間の関係はどのようになっているかについて検討した。表-1はその代表波間の関係について、中城湾と那覇港における観測結果と理論値とを対比して示したものである。表-1からリーフ内側の値が理論値に比較して幾分小さくなっていることがわかる。従って、波力のように代表的な波で考える問題については、以上の点を考慮することが必要であると思われる。

表-1 リーフ内外の波高間係数の比較

地 点	係 数	$\frac{H_{max}}{H_{1/3}}$	$\frac{H_{1/10}}{H_{1/3}}$	$\frac{H_{1/3}}{\bar{H}}$	平均波数 N
中 城 湾	リーフ外側	1.60	1.25	1.55	207
	リーフ内側	1.58	1.22	1.48	160
那 覇 港	リーフ外側	1.62	1.26	1.56	180
	リーフ内側	1.54	1.26	1.43	180
理 論 値		1.61	1.27	1.60	180

(4) 周期特性

深海域より浅海域に侵入した波の周期は余り変化しないとして扱われてきたが、今回対象としているリーフ内の場合には、どのように考えるべきかを検討するため、リーフ内外の周期変化を実測値により比較した。その結果を図-5に示す。図をみても明らかなように両者の周期は非常に大きくばらついており、また両者間に相関があるとはいえないことがわかる。これは高山、河野らの結果と同様である。従って、リーフ内外の波の周期については工学的には他の場合と同様におおむね同一とみなしてもよいものと思われる。

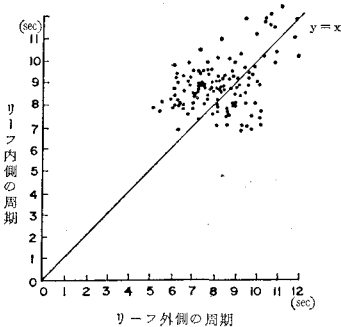


図-5 リーフ内外の周期の変化 (中城湾)

(5) 波のエネルギースペクトルの変化特性

リーフ内外での波のスペクトルの変化を知るため、FFT 法により計算を行なった。結果を図-6に示す。

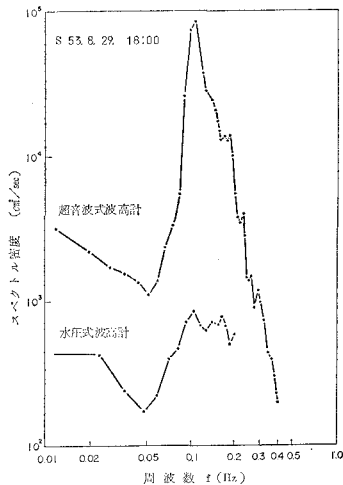


図-6 波のスペクトル変化 (中城湾)

ただし、リーフ内側については、計器が水圧式波高計であり、圧力変動が小さいため、周波数 $f=0.2\text{ Hz}$ 以上の領域の波については計算誤差を考慮してカットした。このため厳密な議論はできないが、傾向としてはリーフ内側ではリーフ外側のスペクトルピーク周波数付近の波のエネルギーが特に大きく減少し、その結果リーフ内側

の波のスペクトルはピーク付近の幅が広くなりフラットに近くなっている。なお、リーフ外側の高周波数側におけるエネルギースペクトルの平衡勾配は Phillips の f^{-5} 則に近い傾向にある。この結果は高山、河野らの結果と一致している。

(6) 波高の変化特性

リーフ内外の波高変化をみるため、両者の対比を行なった。その結果の一部を図-7に示す。なおリーフ上の波の変化と水位との関係を見るため、 η (η は観測期間中の静穏なときを抽出し、それによって平均潮位を求め、その値と実際の潮位との差により求めた) を求め、 $\eta=0.5\text{ m}$ を基準水位としてリーフ内外の波高変化を区分し検討した。リーフ内外の波高変化はリーフ上の水位によって異なり、リーフ上の水位が浅い場合 (図中 $\eta < 0.5\text{ m}$) には波高がほぼ一定値に近づく傾向があるが、深い場合には侵入波の波高が高くなればリーフ上の波高も高くなる傾向を示している。

リーフ上を波が進行する際、リーフ先端部から任意の点までの距離により波が変化することは高山らによる実験結果に示されている。そこで波がリーフ上を進行する場合、その進行距離によって波高がどのように変化するかについて検討した。その結果を図-8に示す。これはリーフの形状と入射波向により進行距離 x が異なるため、各波向についての $H_{1/3}/H_0'$ をそれぞれ求め、

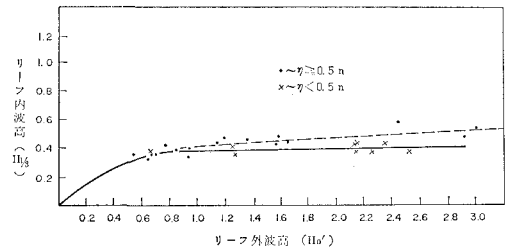


図-7 リーフ内外の波高変化 (中城湾)

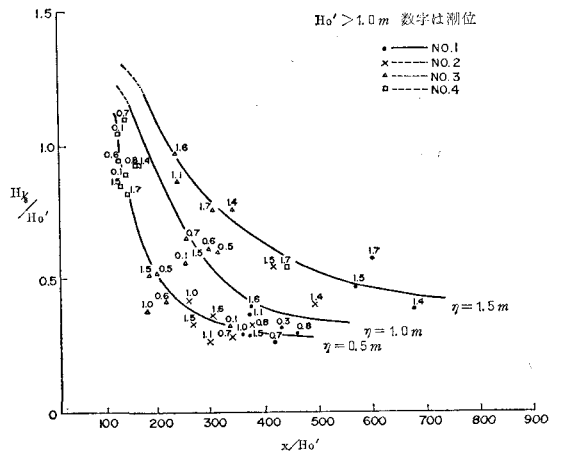


図-8 リーフ上の波高変化 (那覇港)

x/H'_0 と $H_{1/3}/H'_0$ との関係を調べたものである。図-8は那覇港での検討結果であるが、図をみるとかなりバラツキが見られる。しかし傾向的には高山らの模型実験結果と類似しており、 x/H'_0 が大きくなると $H_{1/3}/H'_0$ は小さくなり、また水位が高くなれば $H_{1/3}/H'_0$ は大きくなる傾向を示している。

4. リーフ上の波高算定方式の検討

(1) 従来の波高算定式

深海域から浅海域に侵入した波は、屈折およびその他の浅海での変形を受けながらリーフ前面に到達した後、リーフの急勾配の形状を有する外縁部において半強制的に碎波され、リーフ上での波は段波状となり変化しながら伝播する。

従来、リーフ上での波の変化に関しては、対象地点の海底形状を考慮し、その都度最適と考えられる手法を選定し、検討を行ってきたようである。これらの方法を整理すると次のようになる。

- ① リーフを一種の潜堤とみなし潜堤計算法を適用する。
- ② リーフ上を一様水深と仮定し、海底摩擦による変形計算法を適用する。
- ③ リーフを通常海浜とみなし、碎波変形計算法を適用する。
- ④ リーフの形状を考慮し、上記の ①、② を併用し変形計算を行う。

以上のいずれかの方法を担当者の判断で選定しこれらによってリーフ上の波高を推定してきた。しかし近年、先に述べたように高山らは昭和52年に実験式を提案し、また河野らは昭和53年に摩擦による波高の減衰の式を用いて、その式中の摩擦係数について検討している。以下に高山らおよび河野らによる実験式、算定式を示す。

○ 高山らによる実験式 (高山式)

$$\frac{H_{1/3}}{H'_0} = B \exp \left[-A \frac{x}{H'_0} \right] \frac{\alpha(h_0 + \eta_\infty)}{H'_0}$$

ここで、

$$B = \frac{H_{1/3} \text{ } x=0}{H'_0} - \frac{\alpha(h_0 + \eta_\infty)}{H'_0}$$

ここに、 h_0 はリーフ上の静水深、 $A=0.05$ 、 $\alpha=0.33$ 、 η_∞ は $x=\infty$ における平均水位の上昇量を示す。なお、上式はリーフ先端部からの距離 x が無限大となった地点での波高は一定との考えのもとづいての実験式であり、これは環礁が存在する場合についても適用可能とされている。

○ 河野らによる算定式 (河野式)

$$\frac{H_{1/3}}{H'_0} = K_f = \left[1 + \frac{64}{3} \cdot \frac{\pi^3 \cdot f \cdot H'_0 \cdot K_s^2 \cdot \Delta x}{g^2 \cdot T^4} \left(\frac{1}{\sinh kh} \right) \right]^{-1}$$

ここに、 K_s は浅水係数、 Δx はリーフの先端部からの距

離、 k は波数で $2\pi/L$ で示される。摩擦係数 f の値としては、河野は $f=0.15$ を用いるのがよいとしている。

(2) 現地観測との比較

既存の実測資料より波浪条件、水深条件、リーフ先端部からの距離、その他の諸条件を設定し、それらの条件下における実測値と高山式、河野式による計算値との照合を行い、両式の適合性の検討を行なった。実測値としては那覇港における波浪の観測値をもってこれに当てた。また、高山式では式中の α としては $\alpha=0.33$ を提示しているが、今回の検討では実測結果より $\alpha=0.18$ を得たので、以下の計算では双方の α 値を用い検討した。 α の算定図を図-9に示す。これは α 値を求めるために波高観測値に対して $H_{1/3}/H'_0$ と $(h_0 + \eta_\infty)/H'_0$ をプロットしたものである。

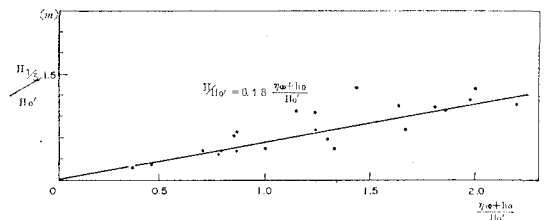


図-9 α の算定図 (那覇港)

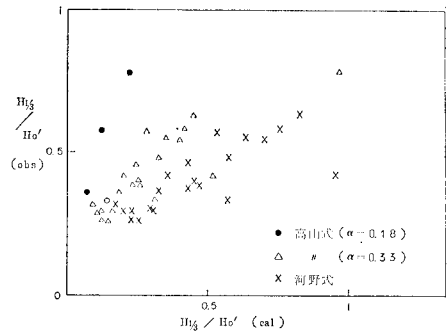


図-10 リーフ上の波高の計算値と実測値の比較 (那覇港)

また、図-10に那覇港における実測値と高山式 ($\alpha=0.33$ 、 $\alpha=0.18$) と河野式 ($f=0.15$) による計算値との比較結果を示す。対比結果からみると、三者とも必ずしも一致しているとはいえないが、実用的には高山式の $\alpha=0.33$ の場合が秀れていると考えられる。高山式の $\alpha=0.18$ および河野式の $f=0.15$ の場合は計算値が低く見積もられている。 $\alpha=0.18$ の場合は α を求めた際の基礎資料が幾分少ないことと、現地の地形の複雑さ等がこのような結果をもたらしたものと考えられる。また河野式は f の値に敏感であり、適合性をよくするには条件によって f の値を変化させる必要があるようである。

次に波浪条件、水位条件および距離 x を設定し、各提案式の差異について計算した。その結果を図-11に

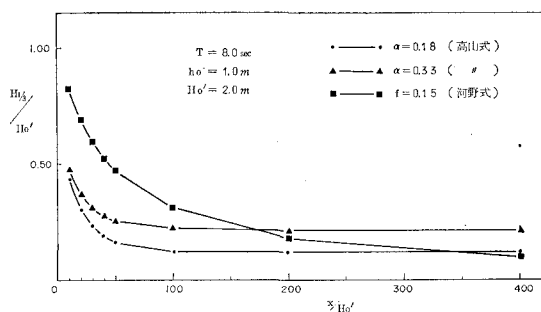


図-11 各算定式による計算結果の比較 (那覇港)

示す。図をみると高山式は $x/H_0' \approx 100$ 程度までは $H_{1/3}/H_0'$ が減少し、それを過ぎると、 $H_{1/3}/H_0'$ はほぼ一定値を示す。また河野式によると、 x/H_0' が増大するに従い $H_{1/3}/H_0'$ は減少する傾向にあることがわかる。

(3) 高山式および河野式の適用性の検討

a) 高山式について

高山式中の α について高山らが提案した $\alpha=0.33$ に対し今回実測値から求めた $\alpha=0.18$ を用いた場合は相対的に計算値が実測値に比べ低い値が得られた。 $\alpha=0.33$ では $H_{1/3}/H_0' < 0.5$ の領域では計算値が若干高く、また $H_{1/3}/H_0' \geq 0.5$ では逆に計算値が低い傾向にある。現地の複雑な形状等を考慮し、多くの地点における波浪を推算するという要請に対して実用的すなわち工学的な観点に立てば高山らの提案した $\alpha=0.33$ 程度の値を利用し、この実験式で計算すればおおむね問題はないものと考えられる。

b) 河野式について

河野式においては、摩擦係数 f の選定が最も基本的で重要な問題である。河野式では平均的に $f=0.15$ 程度を提示しているが、今回の計算結果からも判る通り、リーフにおける波高の変形計算に河野式を用いる際には $f=0.15$ が平均的な値であることを認識し、現地に適合した f を何らかの方法で求めて用いることが肝要である。

5. あとがき

本研究において明らかになった主な事項を整理すると次のとおりである。

1) 波高の相対度数分布は、レーリー分布と比較すると、リーフ外側はよく一致し、リーフ内側では $H/\bar{H} = 1$ 付近に波が集中する傾向にある。

2) 各代表波間の関係を波高間係数でみると、理論値と比較して幾分小さい値となっている。これは碎波等の波の変形により、リーフ内側の波高の相対度数分布がレーリー分布から若干ずれていることに起因しているものと考えられる。

3) 波のエネルギースペクトルは、リーフ内側ではリーフ外側のスペクトルピーク周波数付近の波エネルギーが特に大きく減少し、リーフ内側の波のエネルギーはピーク付近の幅が広くなり、フラットに近くなる傾向がみられる。

4) リーフ内側の波高変化は、リーフ上の水位によって異なっている。リーフ内側の水深が浅い場合には、波高はほぼ一定値に近づく、深い場合には侵入波の波高が高くなれば、リーフ上の波高も高くなる傾向を示す。

5) リーフ外縁からの距離 x による波高の変化は、那覇港の観測結果ではかなりバラツキがみられるが、傾向的には x/H_0' が大きくなるに従い $H_{1/3}/H_0'$ は小さくなる。

6) リーフ内外の周期の関係をみると、非常にバラツキが大きい、リーフ内側の波の周期はリーフ外側の波の周期とほぼ同一とみなすことができる。

7) 今回の実測値と高山式あるいは河野式を比較すると、必ずしもよく一致しているとはいえないが、実測値については現地の複雑な形状等が影響しており、この点を考慮すると高山式は実用的には問題はないものと考えられる。

なお、今後は、水位上昇等について、さらに現地観測結果との比較、解析等を行なっていく必要がある。

本研究の遂行にあたり、終始御指導を頂いた港湾技術研究所波浪研究室長高山知司氏および本研究のためのデータ提供、現地観測等に御協力を頂いた関係各位に感謝の意を表する次第である。

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, 港湾技術研究所資料, No. 278, 1977.
- 2) 河野二夫・永松一甫・喜屋武忠: リーフ上の波の変形に関する現地調査, 第25回海講論文集, pp. 146~150, 1978.
- 3) 岩崎敏夫・真野 明・小杉達郎: 孤立性段波のソリトン分裂に関する研究, 第22回海講論文集, pp. 47~51, 1955.
- 4) Kerry P. Black: Wave transformation over shallow reef, University of Hawaii, Look Laboratory, Technical Report No. 42, 1978.