

リーフによる波浪変形の現地観測

江頭和彦*・福田 功**・岸良安治***・西村達郎****

1. はじめに

沖縄諸島の近海では台風来襲期になるとしばしば異常波浪が発生し、大型の台風では波高が優に 10 m を越えた波が起る。しかし、沖縄諸島の大部分の海岸はリーフによって取り囲まれているため、海岸に侵入する高波はこのリーフ上で碎波し、海岸線に到達する波は極めて小さくなる。このように、リーフは天然の潜堤ともなっていて海岸保全上非常に有効な働きをしているが、このリーフ上に構造物を設計・計画する際にはリーフ上における波浪の変形特性を十分配慮しておくことが肝要となる。

現在、リーフ上における設計波高の算定には主に高山らによる実験式¹⁾を適用することが多いが、この実験式は模型実験結果より得られたもので現地での適合性については、十分に検証されているとは言い難い。また、従来リーフ上での波浪の現地観測^{2),3)}がいくつか実施されているが、これらはいずれも台風時の異常波浪を観測していないため設計波に近い海象条件下でのリーフ上の波の変形を定量的に把握しているとは言い難い。今回、水

圧式波高計をリーフ内外に複数台設置して近年にない大型の台風による異常波浪を観測することができた。本論文は、台風時および冬期季節風時において観測された高波高のデータを基にしてリーフ上の波の変形特性を把握するとともに、上記実験式の現地での適合性について検証したものである。

2. 現地観測およびデータ処理

現地観測は図-1に示すように、沖縄本島の東側と西側の代表的なリーフの2ヶ所を選定して実施した。東側のリーフ（A 地点と称する）は水深が干潮時で 1~3 m その幅が約 1 km、リーフ沖合の海底斜面はほぼ一様に傾斜しており勾配は 0.1 程度である。西側のリーフ（B 地点と称する）は那覇新港の北側に位置し、水深が干潮時で 1~2 m リーフの幅は約 2 km、リーフ沖合の海底斜面は若干の凹凸はあるが 0.07 程度の勾配ではほぼ一様に傾斜している。波浪観測点数は東側が 4 地点、西側が 3 地点でそれぞれリーフ沖合に 1 点、リーフ上に 2~3 点設けた。各観測点の位置および設置水深を図-1に示す。波高計はいずれの地点も同一のものを使用し、高波

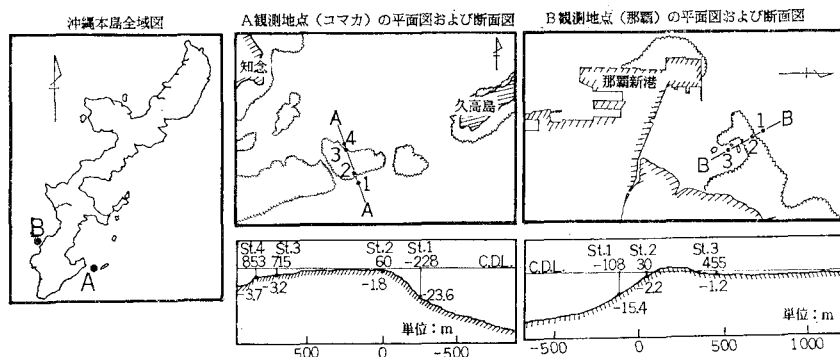


図-1 観測地点位置図

* 正会員 前沖縄総合事務局 港湾計画課長
(現運輸省港湾局 建設課補佐官)

** 正会員 沖縄総合事務局 港湾計画課 建設専門官

*** 正会員 沖縄総合事務局 港湾計画課 工事専門官

**** 正会員 (財)日本気象協会

の碎波時でも使用に耐え得る水圧式波高計（協和商工社製，MTW-II 型）を用いた。得られたデータは水圧値のデジタルデータで、波高計に内蔵されたカセット式磁気テープに収録した。また、観測方法は毎偶数時の正

時前後の約 17 分間とし、波高計に内蔵されたタイマーによって起動する。観測は昭和 58 年 9 月下旬から開始し、東側のリーフでは約 4 ケ月間、西側のリーフでは約 5 ケ月と長期にわたって行った。

磁気テープに収録したデータの処理は電算機を用いて水圧値からゼロダウクロス法⁴⁾により個々の“水圧波”を求めた。これより最大値, 1/10 平均値, 1/3 平均値, 平均値を算出し、従来から使用されている表面波換算式を用いて各代表波の波高, 周期を求めた。 n 値は従来使用されている 1.3 を使用した。

3. 観測結果

(1) リーフ内外の波浪の特性

a) 波高分布

リーフ内外の波浪の特性を調べるため、まず、各観測点の波高分布がどのようになっているかを比較検討した。図-2 に東側 A 地点の波高分布の一例を示す。各点

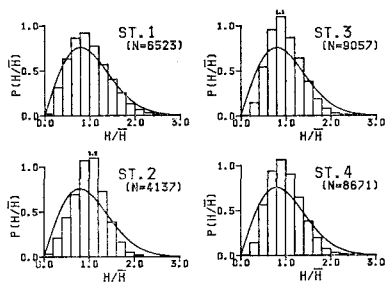


図-2 波高分布

の波高分布は個々のケースの偏りをなくするため、連続する 72 ケース (St. 2 のみ 42 ケース) を統計したものである。また、図中の実曲線はレーリー分布を表わす。図によると、リーフ沖合の St. 1 波高分布はレーリー分布に近い形をしているのに対し、リーフ上、特にリーフ先端に近い St. 2 の波高分布はレーリー分布からかなりずれており $H/\bar{H}=1.0$ 付近の波が多くなっている。また、リーフ奥の St. 3 および St. 4 の分布は St. 2 に比べ若干異なり、 $H/\bar{H}<1.0$ の波が多くなっている。この傾向は西側 B 地点でも同様である。

周期分布についても検討した結果、A, B 地点ともに St. 1 および St. 2 では T^2 レーリー分布に近い形をしているのに対し、St. 3, St. 4 ではレーリー分布に極めて近い分布形となっている。

b) 代表波高間の関係

a) で述べたようにリーフ内と外では波高分布が異なる。そこで、各観測点の代表波高間の関係を調べた。ここでは有義波高に対する他の代表波高との関係について検討した。結果を表-1 に示す。表中の理論値はレーリ

表-1 代表波高間の関係

観測地点	$H_{\max}/H_{1/3}$		$H_{1/10}/H_{1/3}$		$H_{\text{mean}}/H_{1/3}$	
	理論値	実測値	理論値	実測値	理論値	実測値
リーフ外	A St. 1	1.575 (80)	1.479		1.235	0.678
	A St. 2	1.610 (100)	1.386		1.181	0.736
	A St. 3	1.638 (120)	1.572		1.247	0.673
	A St. 4	1.638 (120)	1.556	1.271	1.242	0.626
リーフ内	B St. 1	1.610 (100)	1.544		1.257	0.666
	B St. 2	1.638 (120)	1.311		1.129	0.756
	B St. 3	1.671 (150)	1.575		1.222	0.678

注) () 内の数値は平均的な波の数である。

ー分布に基づく係数で、実測値はリーフ沖合の沖波波高が 2m を越えるケースについて、その平均的なものを示した。また、表には A, B 両地点の結果を示した。この表によると、リーフ内外を問わず各代表波高間の係数はいずれも理論値と若干異なっている。特に A, B 両地点のリーフ先端の St. 2 では他の観測点に比べ理論値との差が大きくなっている。

(2) リーフ内外の波の変形特性

観測開始直後の 9 月下旬に台風の接近による異常波浪を東側 A 地点で観測することができた。ここでは、この異常波浪のデータを用いてリーフ内外の波の変化を調べた。この台風 (8310 号) は大型の強い台風で、沖縄気象台では 9 月 25 日の夜半に最大瞬間風速 50 m/s を記録した。

a) 異常波浪の経時変化

高波高が出現した 9 月 25 日、26 日を中心に A 地点における各観測点の有義波高の経時変化を図-3 に示す。図中の St. 2 の破線が途中で切れているのは、波高計が転倒し欠測したためである。図によると、リーフ沖合の St. 1 では 24 日未明から台風の接近に伴ない急激に波高が大きくなり、25 日の夜半には 10m を越える有義波高が出現している。これに対し、リーフ内各点の波高の経時変化は極めてゆるやかで、出現した有義波高はいずれも 3m 未満である。さらに、リーフ上の波高の変化

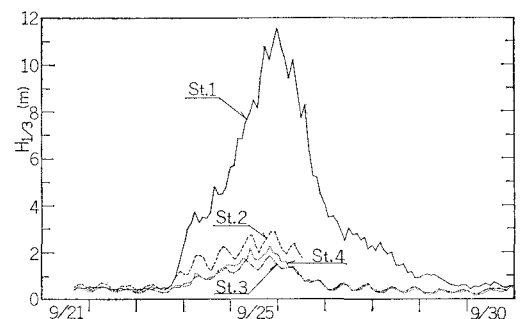


図-3 異常波浪時の経時変化図

をみるといずれの地点も潮汐の変化とともに大きく変化しており、これからリーフ内での波高は沖波のみならずリーフ上の水位によっても左右されることがわかる。

b) 波高変化の特性

リーフ内外の波高変化をみるため、リーフ外の St. 1 の有義波高とリーフ内の各点の有義波高との対比を行った。結果を図-4 に示す。いずれの図も横軸が St. 1 の波高を、縦軸がリーフ内の各点の波高を表わす。図中の記号は、リーフ先端 St. 2 の水位データを用いて区別している。これは、リーフ上の水位と波高変化の関係をみるためである。

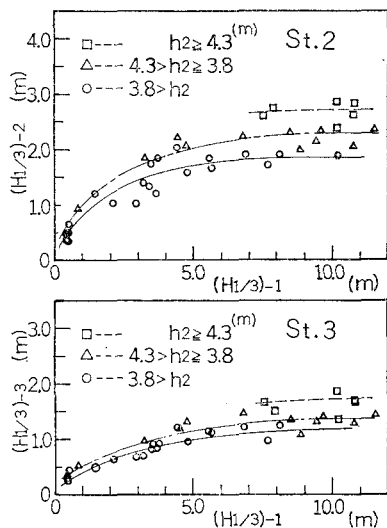


図-4 リーフ内外の波高の関係

これらの図から、リーフ内の波高は沖波波高とリーフ上の水位の両者によって変化することがわかる。特に、沖波波高が 6 m 未満の場合、リーフ内の波高は沖波波高が大きくなるにつれて増大し、リーフ上の水位が高くなれば大きくなっている。一方、沖波波高が 6 m 以上になるとリーフ内の波高は沖波波高よりは、むしろ、リーフ上の水位のみによって変化している。リーフ外波高に対するリーフ内波高の減衰比をみると、St. 2 では $1/2 \sim 1/5$ 程度、St. 3 では $1/4 \sim 1/7$ で、リーフ奥での波高減衰が大きい。また、リーフ内外の周期の変化についても調べたが、高波高時になるとリーフ奥ではリーフ外の周期に比べ若干短くなるという傾向がみられるが、その変化は小さくリーフ内外の周期はほぼ同一とみなしてよいものとする。

c) 波のスペクトル変化

波のスペクトル解析を行い、リーフ内外の波の変形特性を調べた。高波高時のスペクトル解析結果の一例を図-5 に示す。ここで、リーフ外の St. 1 のスペクトル

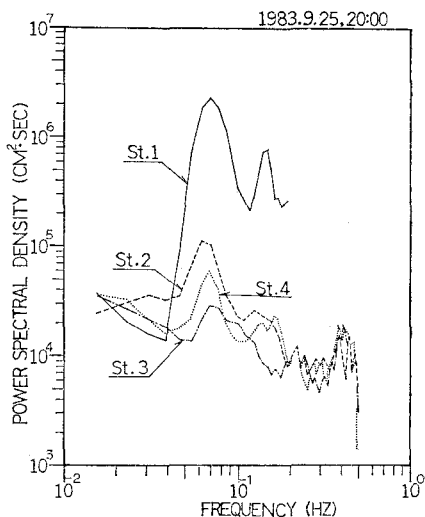


図-5 リーフ内外の波のスペクトル変化

については波高計の設置水深が深いため、 $f=0.2$ Hz 以上の高周波側は水圧変動が小さく計算誤差を考慮してカットしている。これを踏まえて図をみると、St. 1 のスペクトルは極めて明瞭な複峰型で、沖波はうねりと風波の重畳したものであることがわかる。これに対しリーフ内のスペクトルをみると、St. 1 のスペクトルと比較して、ピーク周波数付近から高周波側のエネルギーが大幅に減少しスペクトル幅も広がっている。次に、リーフ内の St. 2 と St. 3, 4 のスペクトルを比較すると、リーフ奥の St. 3, 4 ではピーク周波数付近から 0.2 Hz までのエネルギーが減少している反面、0.2 Hz 以上の高周波側ではほとんどエネルギーの減少は見られず、いずれもフラットに近い形をしている。

(3) 平均水位の変化

高波高発生時のリーフ上における平均水位の上昇について調べた。上昇量の算出には最寄りの検潮所の推算潮位と各観測点の静穏時の平均水位とから回帰直線式を作成し、この式を基準にリーフ内外の平均水位の上昇量を求めた。St. 2 および St. 3 の結果を図-6 に示す。図の横軸は波高水深比を表わし、波高は沖波波高、水深は St. 2 の平均水位を用いている。縦軸は上昇量である。平均水位の上昇量は、リーフ内外のどの観測点でもみら

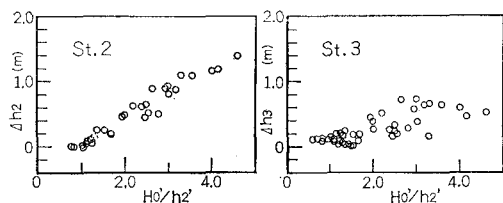


図-6 リーフ上における平均水位の変化

れ、特にリーフ先端に近い St. 2 の上昇量が大きい。さらに St. 2 の水位の上昇について、沖波波高が大きくなると上昇量も増大し、逆にリーフ上の潮位が高くなれば減少するという傾向が明確にみられる。また、リーフ奥よりリーフ先端の上昇量が全般的に高いということは、高山らの実験結果と同様の傾向を示している。

4. 観測結果による実験式の検証

(1) 実験式の概要

高山らは長さ 40 m, 幅 1.5 m の二次元水路を用いて、現地の波高で 2.5~10 m, 周期で 7~14 sec 程度の波を想定し、不規則波を用いた模型実験を行った。その結果、次のようなリーフ上の波高の算定式を提案した。

いま、沖波の有義波高を H_0' 、リーフ上の任意の点の有義波高を H_x 、リーフ先端からの距離を x とすれば、

$$\frac{H_x}{H_0'} = B \exp \left\{ -A \left(\frac{x}{H_0'} \right) \right\} + \alpha \frac{(h_0 + \bar{\eta}_\infty)}{H_0'} \quad \dots\dots (1)$$

ここに、 h_0 はリーフ上の静水深、 $\bar{\eta}_\infty$ は $x=\infty$ での平均水位の上昇量、 α , A は定数で $A=0.05$, $\alpha=0.33$ とし B についてはリーフ先端における $H_{x=0}$ と $x=\infty$ における $\bar{\eta}_\infty$ を合田の碎波帯内の算定図⁵⁾より求め、 H_0' , h_0 を与えることにより求まるとした。

なお、リーフ奥の $x=\infty$ の地点では式 (1) が次のようになる。

$$\frac{H_{x=\infty}}{H_0'} = \alpha \frac{(h_0 + \bar{\eta}_\infty)}{H_0'} \quad \dots\dots (2)$$

(2) 定数 α , A の検討

上式の定数 A , α について、これらが現地のリーフで妥当性があるかどうか兩地点の高波高 ($H_0' \geq 2$ m) のデータを用いて、以下のような検討を行った。

まず、定数 α はリーフの奥 ($x=0$) の波高 ($H_{x=0}$) と水深 ($h_0 + \bar{\eta}_\infty$) に対して、(2) 式で示すような関係にある。そこで、St. 3 はリーフの先端から 400 m 以上離れており、ほぼ $x=\infty$ と考えられ St. 3 における有義波高 H_3 は $H_{x=\infty} \doteq H_3$ と考えてよい。また、St. 2 における水深はリーフ上のほぼ平均的な水位に等しいものと考えられるので $h_0 + \bar{\eta}_\infty = h_2$ とおくことができる。これから $H_3/H_0' = \alpha h_2/H_0'$ となる。

これをもとに、沖波波高の大きさ別に H_3/H_0' と h_2/H_0' との平均的な関係を示したのが図-7 である。これらの図から α は、 $4 \text{ m} > H_0' \geq 2 \text{ m}$ で 0.202, $H_0' \geq 4 \text{ m}$ で 0.332 となる。沖波波高によって α は若干異なるが、沖波波高が比較的高い場合実験値の妥当性を示唆している。

次に A について検討した。(2) 式より $x=0$ とおくと

$$\frac{H_{x=0}}{H_0'} = B + \alpha \frac{h_2}{H_0'} \quad \dots\dots (3)$$

となる。(3) 式の $H_{x=0}$ はリーフ先端の波高であるが、

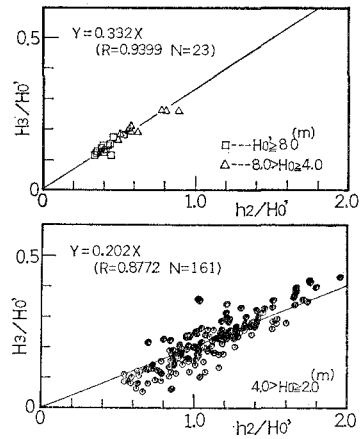


図-7 H_3/H_0' と h_2/H_0' の関係 (α の検討)

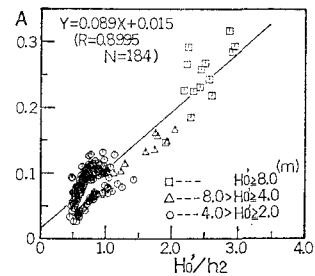


図-8 A と H_0'/h_2 の関係 (A の検討)

合田の碎波帯内の波高略算式よりこれを求め、さらに前述の α の結果を用い個々のケースの B を (3) 式より求めた。そしてこの B と α および St. 2 の波高 (H_2), 距離 (x_2) を直接 (1) 式に代入し A を算出した。図-8 はこのようにして求めた A に対してこれと最も相関のよかった波高水深比 (H_0'/h_2) との関係を示したものである。実験結果によると A は 0.05 なる値が妥当であるとしているが、図からわかるように A の値は一定でなく H_0'/h_2 に対してほぼ直線的に変化することがわかる。

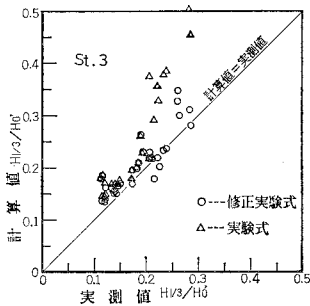
(3) 実測値と計算値の比較

以上の検討結果をもとに表-2 による修正実験式の計算結果とリーフ上各観測点の実測値との比較を行った。

ここで、表-2 の B は本来 (3) 式に基づいてリーフ

表-2 観測結果より得られた定数 α , A および B

定数	数値および式	使用条件
α	0.202	$4 \text{ m} > H_0' \geq 2 \text{ m}$
	0.332	$H_0' \geq 4 \text{ m}$
A	$A = 0.089(H_0'/h_2) + 0.015$	
B	$\min \{B_1, B_2\}$ $B_1 = 0.639(h_2/H_0') + 0.147$ $B_2 = -0.200(h_2/H_0') + 1.248$	$\min \{a, b\}$ は a, b のうちの最小値を表わす



図—9 計算値と実測値の比較

沖合の海底勾配あるいは波形勾配等を考慮して個々に算出すべきであるが、実験式を現地で適用する際、式の簡便性、汎用性を考慮して相当水深 (h_2/H_0) との関係式で表したものである。図—9 は、リーフ奥 St. 3 の実測値と計算値の比較を示したものである。図中の計算値、実測値とも沖波波高 (H_0') で除した値をプロットしており、○印は表—2 による修正実験式による計算値で、△印は高山らによる実験式を示したものである。この図から、St. 3 では沖波波高が高い場合、両方の計算値はほぼ一致しておりしかも実測値に近い値となっている。しかし、ここには掲載していないが、リーフ先端に近い St. 2 では修正実験式による計算値の方がより実測値に近いものとなっている。

従って、リーフ上における波高の算定式として表—2 に示す定数 α , A および B を用いた修正実験式を適用しても実用上問題のないものと考ええる。

5. 結 語

今回、台風によってリーフ沖合では 10 m を超える有

義波高が観測された。

リーフ上に侵入する高波はリーフ先端付近で急激に減衰し、リーフ奥ではほぼ一定値に近づき沖波波高の 10～20% 程度に減衰することがわかった。また、リーフ内の波高減衰は潮位が高くなると小さくなるという実験結果と同様の結果が得られた。このようなことから実験式の妥当性が示唆されたが、式中の定数 α , A を若干修正することによってより現地に適合することがわかった。

今回の観測ではリーフ奥での顕著な水位上昇がみられなかった。これはリーフ奥の岸方向がさらに水深の深い海域となっていること、現象が三次元的であることなどによると考える。しかし、他の海域ではリーフ上の水位の顕著な上昇が報告されており、このような海域での水位の上昇量については今後の課題である。

終りに、本研究を遂行するにあたり、終始御指導を賜った港湾技術研究所波浪研究室長高山知司氏および現地観測およびデータ解析に御協力頂いた(財)日本気象協会の各位に感謝の意を表する。

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 回海岸工学講演会論文集, pp. 146～150, 1978.
- 3) 寺尾 建・長谷川 正・奥村研一・山本政光: リーフにおける波浪変形について, 第 28 回海岸工学講演会論文集, pp. 133～137, 1981.
- 4) 堀田新太郎・水口 優・磯部雅彦: 碎波帯内の波の平面分布特性について, 第 27 回海岸工学講演会論文集, pp. 129～133, 190.
- 5) 合田良実: 浅海域における波浪の碎波変形, 港湾技術研究所報告第 14 巻第 3 号, pp. 59～106, 1975.