

リーフ上の護岸越波特性に関する研究

仲 座 栄 三*・ 津 嘉 山 正 光**・ 日 野 幹 雄***・ 田 場 浩****

1. はじめに

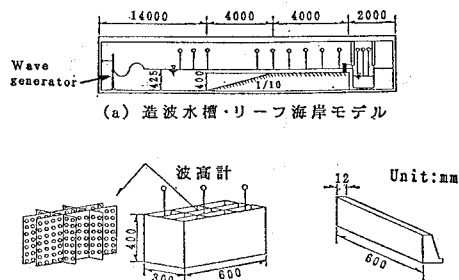
つい最近発生した台風 T9021 により、沖縄諸島にある久米島北海岸は、歴史上稀にみる波浪災害を受けた。この波浪災害は、護岸越波による災害であり、被災護岸前面には長さが約 160 m, H. H. W. L. 時の水深が約 0.5 m 程度のリーフが張り出している（すなわち、護岸前面における 個々波の波高は高々 1 m 程度となる）。この台風による波浪災害の内、何ヶ所かの被災地ではビデオカメラによってその被災状況がつぶさに捉えられている。筆者らはこうした被災地よりわずかに離れた海岸で波浪の現地観測を行っており、この観測データには最近筆者らが指摘しているリーフ上に発生する大振幅のサーフビートが捉えられた。上記の被災護岸は、沖波換算波高が約 11 m の設計波に対して、平均越波流量が $0.02 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{s}$ 以下となるように設計されていた（天端高 $D.L.+5.5 \text{ m}$ ）。被災地住民により撮影された写真やビデオなどから被災時の状況を観察すると、サーフビートの来襲時には平均海面そのものが護岸を越え、背後地は完全に水没し、このような現象が数十分間隔で繰り返し発生していたことが捉えられている。この海岸の場合護岸の高さがあと 1~2 m 程度高ければと悔やまれる。こうした甚大な波浪災害は、沖縄本島東海岸では、頻繁に発生している。被災地住民らはこうした災害が、「数十分間隔で轟音と共に洪水や津波のように押し寄せる高潮によって被災した」と証言している。最近筆者らは、リーフ上の護岸越波が単に一波一波の波による越波現象として説明し得ないことの指摘を行った（仲座ら, 1990a）。本研究では、こうしたリーフ上の護岸越波特性を実験的に明らかにし、リーフ上のサーフビート現象を考慮した新たな平均越波量の定義を提案する事を目的としている。

2. 実験装置及び実験方法

実験装置の概要図を 図一1 に示す。実験に用いた造波

水槽は、琉球大学工学部土木工学科の 2 次元不規則波造波水槽（長さ 27 m, 高さ 1 m, 幅 0.7 m）である。図示のとおり、リーフ海岸モデルは、礁斜面が 1/10 の勾配で、リーフ長 (l) は、護岸設置位置を変えることによって変化させることとし、0~4 m まで 1 m 間隔で変化させた。リーフ上の水深 (h) は、2.5 cm である。実験模型の相似率は、フルード則に従い長さの縮尺を 1/100 とした。したがって、例えば、 $l=4 \text{ m}$, $h=2.5 \text{ cm}$ のリーフモデルは、礁原幅 400 m, 礁原水深 2.5 m の現地リーフ海岸に対応することになる。また、 $l=0 \text{ m}$ の場合は、普通の一様斜面海岸に対応する。護岸モデルは、図一1(c) に示すように、天端幅 1.2 cm の直立護岸である。なお、護岸高さは、3.5, 4.0, 5.0, 6.0, 及び 7.0 cm の計 5 種類のものをを用いた。また、越波流量の測定には、図 (b) に示すような、長さ 0.3 m, 幅 0.6 m, 高さ 0.4 m の集水箱を用いた。集水箱の中には、集水箱内の水面の動揺を抑える目的で 4 枚の仕切り板を設けた。この仕切り板は、図 (b) に示すように、径 8 mm の穴を 1.8 cm 間隔に開けてある。

実験に用いた入射波は、Bretschneider—光易型の周波数スペクトルを有する不規則波で、有義波波高は 3.0~7.0 cm, 有義波周期は 1.0~1.6 秒である。水面変動の測定には合計 12 台の容量式波高計を用い、入射波測定用に 2 台をあて、リーフ上の水面変動測定用に 7 台、越波流量測定用として 3 台を用いた。集水箱内に設置した 3 台の波高計からの信号は、集水箱内の水面攪乱を取り除



図一1 実験装置概略図

* 正会員 工博 琉球大学助手 工学部土木工学科

** 正会員 工博 琉球大学教授 工学部土木工学科

*** 正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科

**** 飛島建設株式会社 土木本部土木部

くために平均され、護岸前面の波高計からの信号との位相差を考慮して、その位相差をゼロとするようにデータのサンプリング開始時間をずらせた。

3. 実験結果及び考察

図-2 は、護岸高を変えることにより、平均越波流量を $\bar{q}=0.02\text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{s}$ (現地スケール) と一定した時の、護岸前面の水面波形 ($\eta(t)$) と越波流量波形 ($q(t)$) のリーフ長による変化を示している。図 (a) は、リーフ長が 0m, すなわち普通の一様斜面海岸の場合であり、以下 (b)~(e) は、リーフ長を 1m ずつ増加させた場合で、図 (e) がリーフ長 4m に対応する。図示の水面変動波形及び越波流量波形は、各測定位置での波形の r.m.s. 値で正規化されている。また、サーフビート波形 (長周期波成分) は、測定された生データに個々波の有義波周期の 2 倍に相当する時間で平滑化をかけることによって取り出した。

図-2 において、 $l=0\text{ m}$ の位置 (すなわち、普通の一様斜面海岸の場合に相当する) に設置された護岸に対する越波流量波形は、その値がゼロとなる時間帯がほとんどなく、測定期間中絶え間なく越波していることを示している。また、越波流量の時間変動は、護岸直前の波の波高の時間変動とほぼ一致している。リーフ長 l が 1m の場合 (図 (b)), 護岸前面の水面変動波形には個々波の波高の連長にはほぼ等しいサーフビート波形が現れている。それと同時に、越波流量の時間変動波形も幾分

“うなる” ようになり、越波がゼロとなるような時間帯も $l=0\text{ m}$ の場合の越波に比べ多少増えている。さらに、リーフ長 l が 2m の場合は、護岸前面に個々波と同程度の振幅を有するサーフビートが出現している。同時に、越波が間欠的に生じるようになり、サーフビートの来襲時のみに越波するような傾向にある。特に、リーフ長が 4m の場合は、このような現象が明確に現れており、サーフビートに伴う水面変動が平均水面よりも高くなった時のみに越波が発生している。このことをより捉え易くしたのが図-3 である。図-3 は、“一波当りの越波流量とそれに対応する護岸前面の個々波の波高” あるいは “サーフビートに伴う平均水位の上昇量” との相関がリーフ長の変化によりどう変化するかを調べたものである。図中、実線は一波当りの越波流量と護岸前面波高との関係を求めた吉川・椎貝・河野 (1967) の理論曲線を示している。

図-3(a) に示すとおり、一様斜面海岸に設置された護岸に対する一波当りの越波流量は護岸前面波高と強い相関を示し、両者の関係は吉川らの理論曲線ではほぼ近似される。また、この場合一波当りの越波量はサーフビートに付随する水位の変動量とは無相関であるものと判断される。しかし、一波当りの越波量はリーフ長が増すにつれて護岸前面波高との相関が徐々に低下し、逆にサーフビートに付随する水位の上昇量と強い相関を示す様になっている。例えば、リーフ長が 4.0m の場合越波流量は、護岸前面波高とはほぼ無相関の関係にあり、サーフ

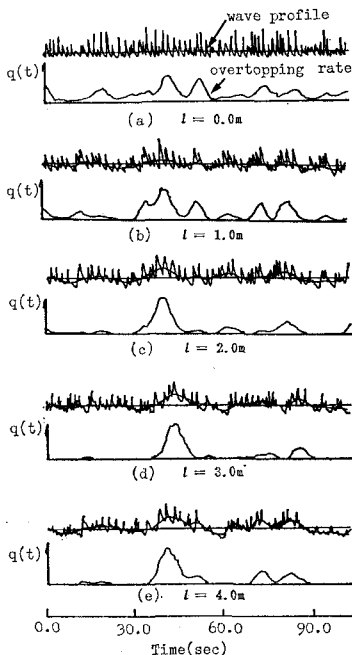


図-2 リーフ上の水面変動波形及び護岸越波流量波形

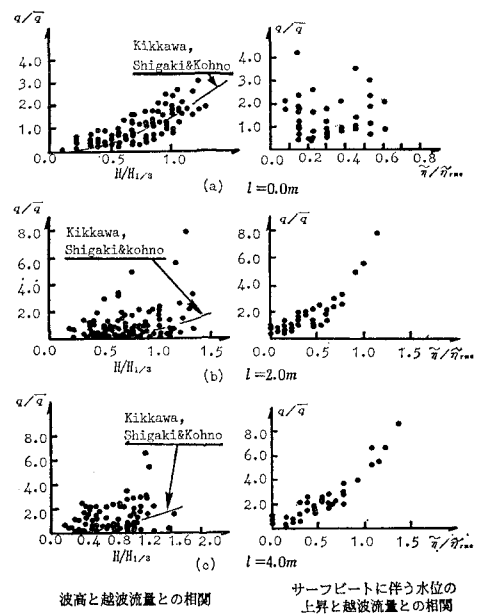


図-3 個々波の波高及びサーフビートの水面変動と越波流量との相関 ($\tilde{\eta}$: サーフピースに伴う水位, $\tilde{\eta}_{rms}$: サーフビート波形の rms 値)

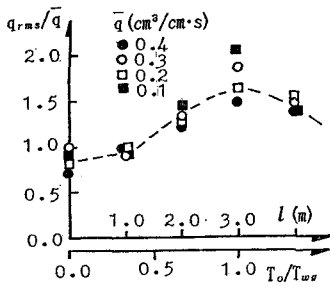


図4 越波流量変動係数($q_{rms}/\sqrt{q}$)のリーフ長による変化

ビートに付随する水位の変動量とは強い相関を示し、ほぼ直線関係にある。

以上のように、リーフ地形海岸に設置された護岸の越波流量は護岸前面のリーフ長によって大きく異なり、リーフ上のサーフビート現象がリーフ上の護岸越波に対する重要な波浪・水理現象の一つであることを示している。また、ここで特に注意しなければならないのは、図—2 及び 3 で示した平均越波流量は、全て同じ値となっていることである。平均越波流量のみに基づいた従来の設計手法によると、ここに示した越波現象はいずれも同じものとなる。しかし、越波流量の観測時間内の平均値が同じであっても、上述のようにその越波特性は大きく異なる。図—4 に、リーフ長及び水深によって規定される海岸の固有周期 (T_0) と来襲波群周期 (T_{wg}) との関係による越波流量の変動係数 (あるいは分散係数, $\gamma_q = q_{rms}/\sqrt{q}$) の変化を示す。図示のとおり、越波流量の変動係数 γ_q は、共振点となる $T_0/T_{wg}=1$ 付近でピーク値をとっており、リーフ上の護岸越波特性に平均海面の共振応答が関係しているものと判断される。なお、越波流量の変動係数は、一様斜面海岸上の護岸に対応する場合 ($l=0$ m) は、0.7 程度であるが、来襲波群周期と海岸の固有周期とが一致する付近では、約 1.6 である^{*1}。

4. リーフ上のサーフビート現象を考慮した護岸越波量算定法の提案

図—2 及び 3 で説明したように、リーフ長が長くなると越波流量は、護岸前面のサーフビートに伴う水面変動に支配されるようになる。すなわち、“サーフビートに付随する水面変動が平均水面よりも上昇するときのみ越波が生じる”ようになる。こうしたことを考えると、護岸越波量として、サーフビートに伴う水面上昇があるしきい値を越えている間の平均を用いることによって、サーフビートを考慮した一つの短時間平均越波流量 (観測時間内の単なる平均でなく、サーフビートが来襲して

いるときのみの短時間平均) が定義される。しかし、この場合、リーフ長が 1 m よりも短くなるとサーフビート現象が不明確となることから、普通の一様斜面海岸護岸の場合にも適用し得る一般的な定義法とはならない。そこで、本研究では、リーフ長がある程度長い場合は、越波流量がサーフビートによって規定されているところに着目し、“サーフビート波形の変動パターンと越波流量波形の変動パターンとがほぼ一致する”ものとの仮定を設ける。このようにすると、新たな短時間平均波流量は；

“越波流量波形が平均越波流量 ($\bar{q}$) を越えている (仮定によると、サーフビートに伴う水位の上昇量があるしきい値を越えている) 時間帯で求めた越波流量の平均値”、

として定義される。図—5 は、上述の短時間平均越波流量の定義の概念図を示している。勿論、ここで導入した仮定は、上述のようにリーフ長が長い場合のみ成立するものである。リーフ長が短くなり、例えば、普通の一様斜面海岸護岸の場合のように護岸前面のサーフビートが個々波に比較して無視し得る程度となると、前述の仮定は成立しなくなる。しかしながら、ここで新しく定義した平均越波流量は、従来の平均越波流量との間にある一定の関係を持つものと考えられる。すなわち、ここで提案した短時間平均越波流量の定義に従えば、リーフ長がゼロとなる場合には、従来の平均越波流量特性値とほぼ同じ意味となり、リーフ長が増加するにつれ (正確には、来襲波群と平均海面との共鳴度が強くなるにつれ)、サーフビートの越波効果を直接的に反映するようになる。

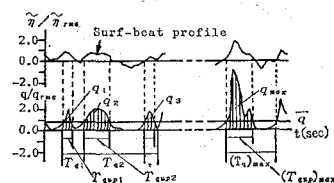
図—5 で示す新たな短時間平均越波流量は次式で与えられる。

$$\bar{q}_{new} = \sum_{i=1}^N q_i / \bar{T}_{q-up} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\bar{T}_{q-up} = \sum_{i=1}^N T_{q-upi} / N \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\bar{T}_q = \sum_{i=1}^M T_{qi} / N \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $\bar{q}_{new}$: 新しい短時間平均越波流量, $\bar{T}_{q-up}$: 越波流量波形が平均越波流量 ($\bar{q}$) を超えている時間 (以下これを平均越波継続時間と呼ぶ), $\bar{T}_q$: 越波流量波形が平均越波流量を超え、再度平均越波流量を zero-up す



図—5 新しい平均越波量の定義図

*1 海岸の固有周期及び波群周期算定法など、共振現象として発生するリーフ上のサーフビートに関しては、仲座 (1990b) を参照。

るまでの時間（以下これを越波の繰り返し平均周期と呼ぶ）、 N ：越波流量が平均越波流量を zero-up-cross する回数、である。

上述の短時間平均越波流量とは別に、護岸背後の防災という面からは、図-5 に示すような、観測時間内に出現した最大越波流量を含み、かつ平均越波流量を超えている時間内の平均量（以下、最大平均越波流量と呼ぶ）も重要な意味を有する。すなわち、個々波の最大波高に対する最大越波量がかかなり局地的・瞬間的な、現象であるのに対して、ここで示す最大平均越波流量はある程度長い時間内で平均された量であり、護岸のすぐ背後地が民家などの場合、この最大平均越波流量が設計基準値を最低限満足する必要があると考えられる。

図-6 は、ここで提案する定義に従った短時間平均越波流量 ($\bar{q}_{new}$) と従来の定義による平均越波流量との比のリーフ長（あるいは、海岸の固有周期と来襲波群の平均周期との比、 T_0/T_{wg} ）による変化を示している。図示のとおり、 T_0/T_{wg} の値が1に近づくにつれて、短時間平均越波流量は従来の定義に従った越波流量に比べてだいに大きくなり、来襲波群とリーフ上の平均海面とが共鳴する付近で両者の差が最大となっている。

図-7 は、式 (2) 及び (3) で定義される越波継続時間 ($\bar{T}_{q-up}$) と越波の繰り返し平均周期 ($\bar{T}_q$) のリーフ長 (T_0/T_{wg}) による変化を示している。まず、

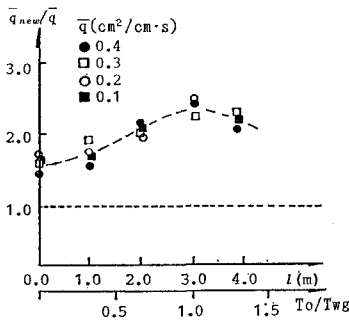


図-6 新しい平均越波流量(q_{new})のリーフ長による変化

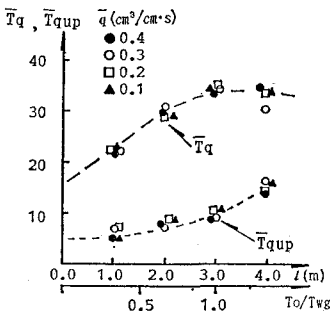


図-7 平均越波流量を越える越波の継続時間 (T_{q-up}) 及び繰り返し周期 (T_q) のリーフ長による変化

$\bar{T}_q$ について見ると、リーフ長の増加と共に増大し、海岸の固有周期と来襲波群周期とが一致する共振点付近で極大値をとるような変化を示している。一方、越波継続平均時間は、リーフ長の増加と共に単調に増加している。以上のことより、リーフ長が増加（正確には、波群の周期が海岸の固有周期に接近）するにつれて、越波の繰り返し周期は長くなり、越波の継続時間も普通の一様斜面海岸上での越波に比べてかなり大きくなることがわかる。

上述のことは、最大越波流量を含み、かつ平均越波流量を超えている時間帯のみの平均値である最大平均越波流量 ($\bar{q}_{max}$) で顕著に現れる。図-8 は、この最大平均越波流量について、図-6 と同様な比較を行ったものである。 $\bar{q}_{max}$ と $\bar{q}$ との比は、リーフ長が増加するにつれて、すなわち来襲波群がリーフ上の平均海面と共鳴の度が増加するにつれて急激に増大している。この越波流量比 $\bar{q}_{max}/\bar{q}$ は、波群と海岸の固有周期とが一致する付近で約 5.5 となり、 $\bar{q}_{max}$ は普通の一様斜面海岸護岸に対する値の実に 2.5 倍にも達する。このことは、「リーフ上の護岸越波による被災海岸が数十分の間隔で繰り返し襲う津波のような高潮（越波）によって甚大な被害を被った」とする被災地住民らの証言と一致する。

図-9 は、新しい定義法に従った無次元平均越波量を相対天端高で整理したものである。図中の l は、リーフ長を示している。図-10 は、図-9 を基に、換算沖波

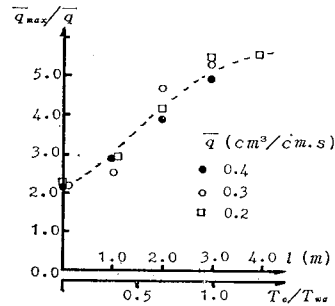


図-8 最大越波流量を含む短時間平均越波流量 ($q_{max}\sqrt{q}$) のリーフ長による変化

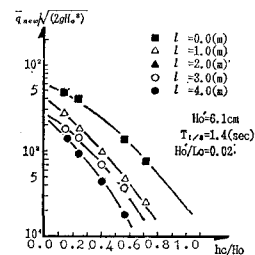


図-9 新しい平均越波流量 (q_{new}) の相対天端高 (h_c/H_0) による変化

波高 $H_0'=12.0\text{ m}$ 、有義波周期 $T_{1/3}=13.0\text{ s}$ の沖波に対し、リーフ上水深を 2.5 m 程度とし、訴容越波流量の条件を $\bar{q}=0.02\text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{s}$ と設定した場合における護岸高さ (h_c) を、従来の越波量の定義に従った場合と、新しく提案する定義に従った場合との両方で求めた結果を示している。図中、○印が従来の定義によるもので、□印は新しい定義によるものである。比較のために図中には合田あるいは高山らの算定手法による値も同時に示してある。図示のとおり、リーフ長がゼロとなる場合、すなわち普通の一様斜面海岸の場合は、両者の差は殆ど現れていない。しかしながら、リーフ長が長くなるにつれて両者の差は大きくなっている。一方、合田の手法による計算値は、リーフ先端で実験結果より高くなり、リーフ上では急激に減少して実験値よりかなり低い値を示している。また、高山らの算定式から求めた護岸高さは、一般的に実験結果よりかなり大きくなっている。これは、高山らの算定式中の係数に大きなばらつきがあることと、越波量算定の基準（リーフ先端での護岸越波量）として合田の図表を用いていることによるものである。この図において、×印は、越波により被害甚大となった経験を有するリーフ海岸に設置されている護岸のリーフ先端からの距離と護岸天端高を示している（沖縄本島楚洲海岸、港川海岸）、図示のとおり、×印で示す護岸高はいずれの場合も平均越波流量 ($\bar{q}$) より求めた天端高とほぼ一致する。しかし、 $\bar{q}_{new}$ を用いて算出した護岸天端高は、被災護岸の天端高よりも約 2 m 程度高くなる

っている。以上のことより、ここで提案する短時間平均越波流量の概念の有用性が理解される。

5. おわりに

本研究では、リーフ地形海岸での護岸越波による災害箇所のおとんどが被害甚大であったことに鑑み、このことにサーフビートが直接的に関係しているのではなかろうか？ という観点から、リーフ上の護岸越波量に及ぼすサーフビートの影響について実験的に検討した。その結果、以下に示すような結論を得た。

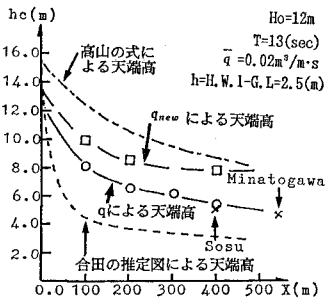
(i) 同一の平均越波流量を有する護岸に対して、普通の一様斜面海岸上の護岸越波流量は、越波の繰り返し周期が短く絶えず越波を生じる。しかし、リーフ長が増加するにつれ、越波の繰り返し周期が長くなり、間欠的な越波となる。

(ii) これは、護岸越波流量がサーフビートの影響を直接受けることによるもので、リーフ長が現地スケールで 100 m を越えると、平均越波流量を越える越波はサーフビートに伴う変動水位が平均水面より上昇する時のみ発生するようになる。

(iii) そのようなことから、サーフビートの来襲時、すなわち越波流量が平均越波流量を越えている時間帯のみの越波に着目し、サーフビートの効果を含んだ平均越波流量の定義法を新たに提案した。この定義による護岸越波流量は、リーフ長によって変化し、来襲波群とリーフ上の平均海面の共鳴現象をよく表現し得るものであることがわかった。

参 考 文 献

- 合田良賢 (1984): 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版, p. 237.
- 高山知司・古川正美・立石義博 (1987): 復断面海岸における護岸越波流量に関する模型実験, 運輸省港湾技研技研資料 No. 592.
- 仲座栄三・津嘉山正光・砂川勇二・日野幹雄 (1990a): リーフ上の護岸越波特性, 土木学会第 45 回年次学術講演会, pp. 758-759.
- 仲座栄三 (1990b): リーフ海岸における段波状サーフビートの発生とその防災対策に関する基礎的研究, 東京工業大学学位論文, 180 p.



図—10 護岸天端高のリーフ長による変化 (×印は、被災地における護岸天端高を示す)