

# 直立護岸越波に及ぼすリーフ形状と波浪諸量の影響について

## Effect of Reef Topography and Wave Condition on Wave Overtopping of Vertical Seawall

川崎浩司<sup>1</sup>・菊 雅美<sup>2</sup>・舟橋 徹<sup>3</sup>

Koji KAWASAKI, Masami KIKU and Toru FUNAHASHI

It is well known that wave deformation around Okinawa Islands is very complicated because of reef topography. The objective of this study is to investigate the effects of reef length and wave condition on wave overtopping rate of a vertical seawall in an irregular wave field by conducting hydraulic model experiments. The experimental results showed the dimensionless wave overtopping rate decreases exponentially with an increase in the dimensionless reef length. It was revealed that the amplitude of long wave components in front of the seawall tends to increase with the dimensionless reef length  $R/h$  and the Ursell number  $U_r$ . Moreover, the results indicated that the dimensionless wave overtopping rate is affected by not only the relative crown height of the seawall but also the amplitude of long wave components.

### 1. はじめに

天然リーフ海域を有する沖縄諸島は、低気圧の接近・通過時において、護岸の倒壊や背後地の浸水、道路護岸の通行規制など、高潮・高波による越波災害を受けている。沖縄諸島における越波災害について、仲座・日野(1988)や仲座ら(1991)は、台風被災地の実態調査から、リーフ海域特有の波浪変化・伝播状況を発災要因として挙げるなど、リーフ海域は他の海域に比べて複雑な波浪場であることが既往の研究によって明らかになっている。そのため、リーフ上の波高算定方法について、水理模型実験や現地観測結果に基づく数多くの検討が行われてきた(例えば、高山ら, 1977; 江頭ら, 1985; 津嘉山ら, 1995)。しかし、各経験式から算定される波高は波浪条件によって差異が生じるため、不揃いな護岸天端高や設計者の混乱を招いている。このような背景を鑑み、川崎ら(2007, 2008)は、波浪条件や護岸形状を変化させた数値計算により、対象地域に最適な越波対策工法の選定が可能であることを示すとともに、水理模型実験との比較から、リーフ地形を対象とした越波計算に対する数値波動水路の妥当性を検証してきた。しかし、リーフ上の波高減衰や平均水位の上昇、長周期波の卓越などが及ぼす越波流量への影響を明らかにするには至っていない。

本研究では、リーフ地形に設置された直立護岸を対象に、リーフ長や入射波条件を様々に変化させた水理模型

実験を行い、リーフ上における波浪状況を把握するとともに、護岸前面の波浪諸量が越波量に及ぼす影響について考究することを目的とする。

### 2. 水理模型実験

名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻所有の断面2次元造波水路(長さ30m, 高さ0.9m, 幅0.7m)を用いて、リーフ地形上に設置した直立護岸に対する越波実験を行った。図-1に造波水路および計測機器の概略を示す。本実験では、沖縄本島周辺海域の現地海底地形を参考に、1:10の斜面勾配を前面部に有する一様水深のリーフ地形を縮尺1:40で単純モデル化し、岸には直立護岸を設置した。実験条件は、表-1に示すとおり、リーフ長 $R$ を5ケース、リーフ上水深 $h$ および相対天端高 $h_r/H_0'$ をそれぞれ3ケースずつ設定した。作用波は、修正Bretschneider・光易型のスペクトル形状を有する不規則波とし、沖波波形勾配 $H_0'/L_0$ が0.017および0.036となるように、沖波波高 $H_0'$ と有義波周期 $T_{1/3}$ を変化させた。

本実験では、リーフ上の波浪特性を検討するため、図-1に示すW1~W34の位置に容量式波高計を設置し、水位 $\eta$ の時系列変化を計測した。そして、計測時間内の平均水位 $\bar{\eta}$ を求めるとともに、ゼロダウンスロス法によって有義波高 $H_{1/3}$ を算定した。また、本研究では、水位の時系列変化から0.2Hz以下(現地換算周期30s以上)のローパスフィルタによって算出される成分を長周期波成分 $\zeta$ と定義し、 $\zeta$ の二乗平均平方根 $\zeta_{rms}$ を長周期波成分の振幅とした。護岸背後には越波弁を設置し、導水板を通じて流入した水塊の総重量を導水板の幅で除して越波量 $Q$ とした。さらに、 $Q$ を計測時間で除することで越波流量 $q$ を求めた。なお、1回の計測時間は約330sとし、同一条件下において3回の測定を行った。

- 
- |        |      |   |
|--------|------|---|
| 1 正会員  | 博(工) | 名古屋大学准教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻               |
| 2 学生会員 | 修(工) | 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻・(独)日本学術振興会特別研究員DC |
| 2 学生会員 | 学(工) | 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻                   |

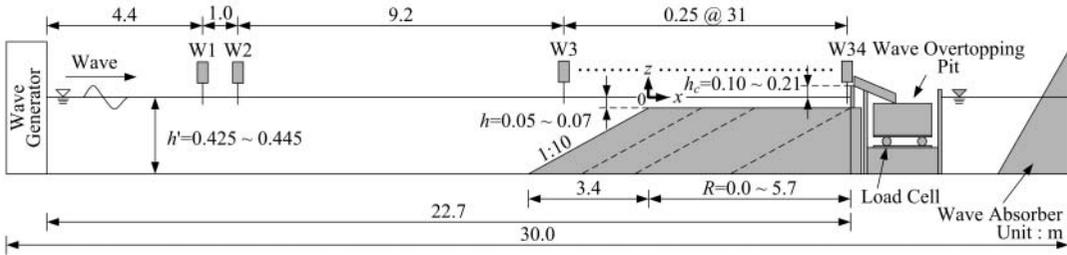


図-1 断面2次元造波水路と計測機器の概略図

表-1 実験条件

リーフ長 $R$	0.0m, 1.2m, 2.7m, 4.2m, 5.7m
リーフ上水深 $h$	0.05m, 0.06m, 0.07m
相対天端高 $h_c/H_0'$	0.9, 1.7, 3.7
波形勾配 $H_0'/L_0$	0.017, 0.036

3. リーフ長が及ぼす波高・平均水位・越波流量の影響

(1) 波高と平均水位の空間分布

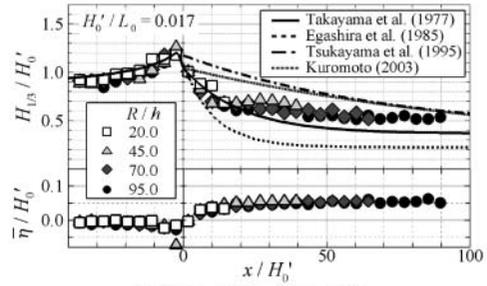
リーフ上の波高算定式として、高山ら (1977) は水理模型実験結果に基づく次式を提案している。

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

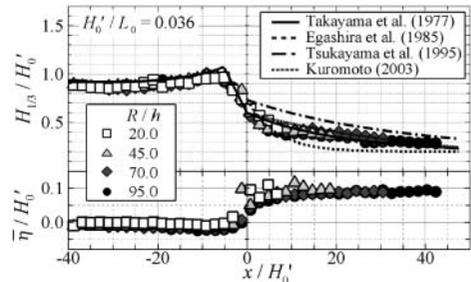
ここに、 $x$ は礁縁 ( $x=0$ ) からの岸向き距離、 $h$ はリーフ上の静水深、 $\bar{\eta}_\infty$ は $x=\infty$ における平均水位の上昇量である。式 (1) 中の係数 $B$ は式 (2) で示され、 $x=0$ での波高比  $H_{1/3}/H_0'$ と無次元平均水位  $\bar{\eta}/H_0'$ は、碎波帯内の有義波高および不規則波の浅水変形による平均水位の変化の算定図 (合田, 1975) からそれぞれ算出される。また、式 (1) および式 (2) 中の係数 $A$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ について、高山ら (1977) は、0.05, 0.33, 0.56の一定値を与えている。

$$\left. \begin{aligned} B &= \frac{(H_{1/3})_{x=0}}{H_0'} - \alpha \frac{(h + \bar{\eta}_\infty)}{H_0'} \\ \frac{h + \bar{\eta}_\infty}{H_0'} &= \sqrt{\frac{C_0}{1 + \frac{3}{8}\beta\alpha^2}} \\ C_0 &= \left(\frac{h + \bar{\eta}}{H_0'}\right)_{x=0}^2 + \frac{3}{8}\beta \left(\frac{H_{1/3}}{H_0'}\right)_{x=0}^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

式 (1) に対し、江頭ら (1985)、津嘉山ら (1995) および黒本 (漁港・漁場の施設の設計の手引検討委員会, 2003) は、現地観測値との整合性の観点から、式 (1) および式 (2) 中の各係数について修正値をそれぞれ提案している。特に、波高の減衰率を表す係数 $A$ に着目しており、各経験式ともに、係数 $A$ を波高水深比  $H_0'/h_2$  ( $h_2 = h + \bar{\eta}_\infty$ ) の関数としている。



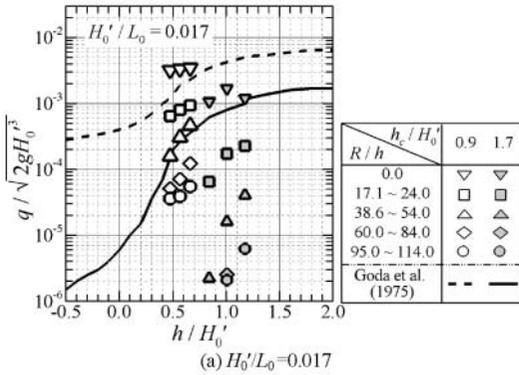
(a)  $H_0'/L_0=0.017, H_0'/h_2=0.98$



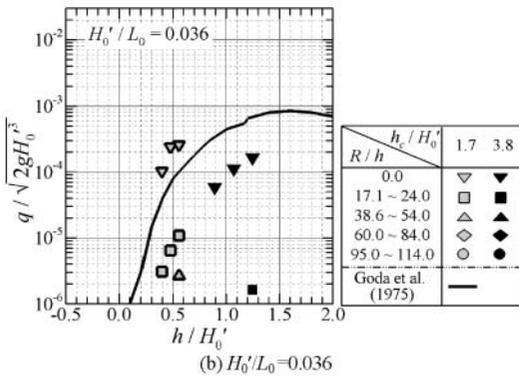
(b)  $H_0'/L_0=0.036, H_0'/h_2=1.80$

図-2 無次元リーフ長による波高・平均水位分布の違い

図-2に、リーフ長と水深の比である無次元リーフ長  $R/h$ を変化させたときの波高比  $H_{1/3}/H_0'$ および無次元平均水位  $\bar{\eta}/H_0'$ の空間分布を示す。また、同図に、上述の各経験式から得られる  $H_{1/3}/H_0'$ の算定値を併せて示す。なお、礁縁より沖側 ( $x > 0$ ) の  $H_{1/3}/H_0'$ は、合田 (1975) による波高の略算式から算定した。同図から、浅水変形の影響により、リーフ前面の斜面上において  $H_{1/3}/H_0'$ が増大するものの、礁縁付近での碎波によって、リーフ上の有義波高は沖波波高に対して著しく減少することがわかる。つまり、碎波によって radiation stressが減少するため、礁縁では  $\bar{\eta}/H_0'$ が顕著に上昇することになる。しかし、リーフ上では波高がほぼ一定で、radiation stressの空間変化が若干となるため、平均水位は一定になっている。また、同図から、本実験結果は、多少のばらつきがみられるものの、 $R/h$ に関わらず、同一の  $x/H_0'$ に対する  $H_{1/3}/H_0'$ はほぼ一致している。一方、図-2 (a) に例示するように、 $H_0'/h_2$ が小さい波浪条件では、各経験式から算出される波高比に大きな差異が生じている。この主要因は、前述



(a)  $H_0'/L_0=0.017$



(b)  $H_0'/L_0=0.036$

図-3 無次元リーフ長による無次元越波流量の違い

のように、式(1)中の係数Aが波高水深比 $H_0'/h_2$ によって異なるためである。ただし、本実験結果は、水理模型実験に基づいて導出された高山式とよく一致していることから、リーフ上の波高分布の算定方法として、礁縁からの距離に応じて波高を指数関数的に減少させる従来の経験式の考え方が妥当であることを確認した。

(2) 無次元越波流量

図-3に、水深波高比 $h/H_0'$ と無次元越波流量 $q/\sqrt{2gH_0'^3}$ の関係を示す。なお、図中の点線および実線は、リーフ前面の斜面勾配に基づき、1:10の海底勾配地形に対する合田ら(1975)の越波流量算定図から、 $h_c/H_0'=0.9$ および1.7に対して読み取った値を示している。同図から、1:10の海底勾配地形を意味する $R/h=0.0$ の実験結果は、合田ら(1975)による算定値とほぼ同等の精度で $q/\sqrt{2gH_0'^3}$ が得られていることがわかる。一方、 $R/h$ の増大とともに $q/\sqrt{2gH_0'^3}$ は減少していることから、リーフ地形による $q/\sqrt{2gH_0'^3}$ の低減効果がみられる。さらに、その効果は、図-3(a)に示すように、 $h_c/H_0'$ が0.9よりも1.7の場合の方が大きいことがわかる。また、無次元リーフ長 $R/h$ と無次元越波流量 $q/\sqrt{2gH_0'^3}$ の関係を示す図-4から、 $R/h$ と $q/\sqrt{2gH_0'^3}$ には指数関数的な関係が認められる。本研究では、相対天端高 $h_c/H_0'$ のケース数が少ないため、両者

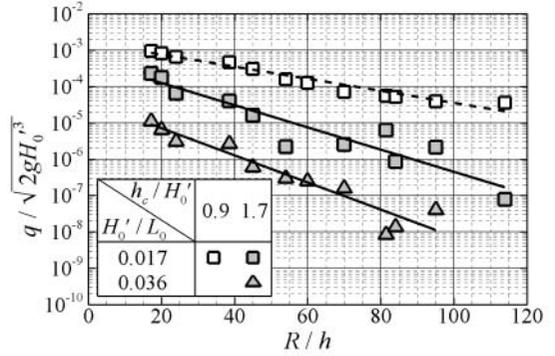
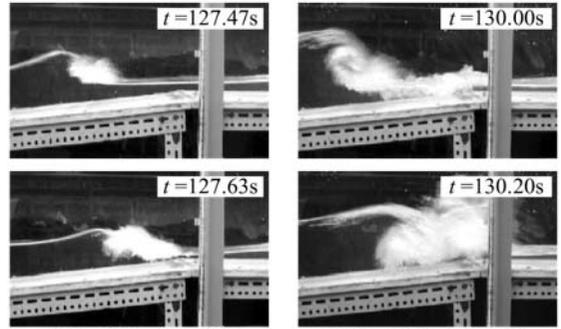


図-4 無次元リーフ長と無次元越波流量の関係



(a)  $U_r=0.78, R/h=95.0$  (b)  $U_r=50.18, R/h=95.0$

写真-1 礁縁付近における碎波状況

の関係について一定の傾向があることを示すに留まっているものの、同図は、リーフ長を考慮した越波流量の算定が可能であることを示唆している。

4. 入射波特性が及ぼすリーフ上の波浪変形と越波流量の影響

第3章では、リーフ上の波高分布はリーフ長に関わらず、礁縁からの距離によって指数関的に減少することを示した。一方、越波流量に対しては、リーフ長による越波流量の低減効果が明らかとなった。したがって、リーフ海域においては、リーフ上の波浪変化を十分に考慮した越波流量の算定が必要であると考えられる。そこで、本章では、入射波条件とリーフ長がリーフ上の波浪変形や直立護岸の越波流量に及ぼす影響について考究する。

(1) 入射波条件によるリーフ上の波浪変形

入射波条件が及ぼすリーフ上の波浪場への影響について、本研究では、波の非線形性を表すアーセル数 $U_r (=H_0' L_0^2 / h^3)$ 、 $h'$ : 沖側水深)に着目し、水理模型実験中の目視と撮影したビデオ画像から考察する。写真-1に、時間帯における礁縁付近の碎波状況を例示する。 $U_r$ が0.78の場合、写真-1(a)に示すように、礁縁付近において巻き波型碎波が発生しており、写真-1(b)に示す $U_r=50.18$ においても同様に礁縁付近で碎波が生じて

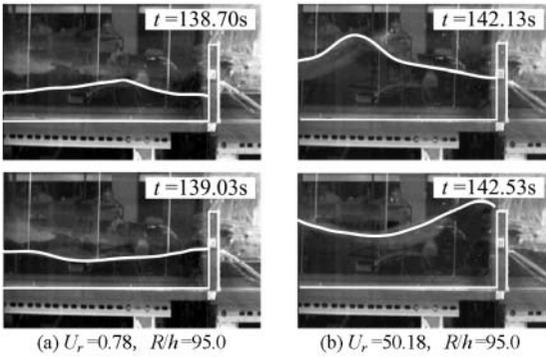


写真-2 護岸前面における波浪状況

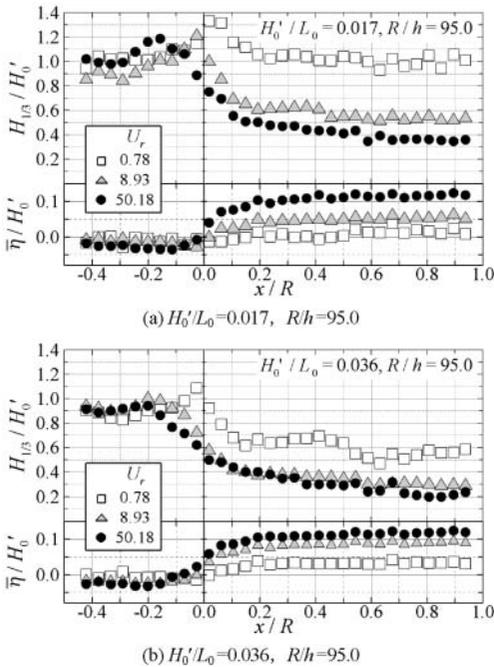
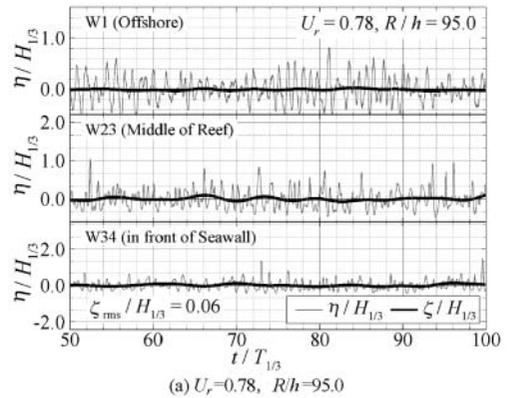
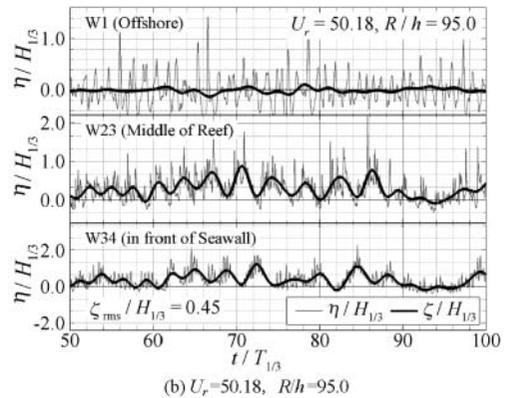


図-5 アーセル数による波高・平均水位の違い

いる。不規則波作用下のため、両者の写真を単純に比較することはできないものの、一連の実験において、碎波規模は  $U_r=0.78$  に比べて  $U_r=50.18$  の方が大きく、大規模な碎波後には礁縁付近において冲向きの戻り流れの発生が確認された。さらに、戻り流れの影響により礁縁付近の水深が極端に浅くなるため、進行波はリーフ先端部で碎波を繰り返した後、段波状にリーフ上を進行していく様子がみられた。写真-2は護岸前面における波浪状況であり、水面波形を白線で図示している。写真-2 (b) に示すように、 $U_r=50.18$  では、リーフ上を段波状に進行してきた水塊によって護岸前面の水位が顕著に上昇し、護岸背後へと越流する様子が確認された。このようなリーフ上の波浪伝播および越波状況は、越波災害発生時の状況について被災地住民からヒアリングした仲座・日野



(a)  $U_r=0.78, R/h=95.0$



(b)  $U_r=50.18, R/h=95.0$

図-6 水位の時系列変化

(1988) の報告に類似している。以上から、入射波の  $U_r$  が大きいほど、礁縁での碎波規模は大きく、リーフ上の波浪変化も著しくなることが定性的に判断された。そこで、図-5に、入射波のアーセル数  $U_r$  を変化させたときの波高比  $H_{1/3}/H_0$  および無次元平均水位  $\bar{\eta}/H_0$  の空間分布を示す。同図から、 $U_r$  が大きいほど、リーフ上の波高減衰と水位上昇は顕著になることがわかる。図-6は、沖側 (W1)、リーフ中央 (W23)、護岸前面 (W34) における無次元水位  $\eta/H_{1/3}$  および長周期波成分と有義波高の比  $\zeta/H_{1/3}$  の時系列変化であり、護岸前面における  $\zeta/H_{1/3}$  の卓越が認められる。さらに、 $U_r$  の増大によって、護岸前面では水位変動に対する長周期波成分が支配的になることがわかる。護岸前面における長周期波成分の振幅と有義波高の比を  $\zeta_{rms}/H_{1/3}$  とし、 $U_r$  と  $\zeta_{rms}/H_{1/3}$  の関係を図-7に示す。同図から、 $U_r$  の増大とともに  $\zeta_{rms}/H_{1/3}$  も増加する傾向にあることがわかる。また、 $U_r$  が同一の場合は、無次元リーフ長  $R/h$  が大きいほど、 $\zeta_{rms}/H_{1/3}$  も増大している。

(2) リーフ地形における直立護岸の越波流量特性

前節では、入射波の非線形性が平均水位の上昇や水位変動に対する長周期波成分の発生に影響を与えることが明らかとなった。したがって、護岸前面の波浪状況は直

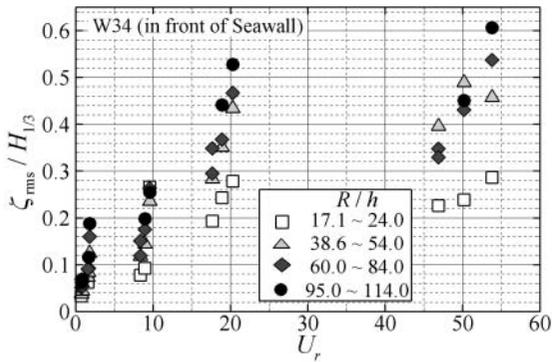


図-7 入射波のアーセル数と護岸前面の長周期波成分の関係

立護岸の越波流量にも影響を及ぼすと考えられるため、本節では、直立護岸の越波流量と護岸前面の長周期波成分の関係について検討する。

EurOtop (The EurOtop Team, 2008) に倣い、図-8に、護岸前面の有義波高  $H_{1/3}$  を用いた無次元越波流量  $q/\sqrt{gH_{1/3}^3}$  と護岸前面における  $\zeta_{rms}/H_{1/3}$  の関係を、相対天端高  $h_c/H_0'$  および無次元リーフ長  $R/h$  ごとに示す。図-8 (a) より、 $h_c/H_0'=0.9$  のときは、 $\zeta_{rms}/H_{1/3}$  の増大による  $q/\sqrt{gH_{1/3}^3}$  の変化はほとんどみられない。一方、図-8 (a) および (b) から、 $h_c/H_0' < 1.7$  の場合は、 $\zeta_{rms}/H_{1/3}$  の増加による  $q/\sqrt{gH_{1/3}^3}$  の低減率が大きくなっている。この要因について、本研究では詳細な検討には至らなかったものの、護岸前面における長周期波成分の卓越、すなわち平均水位の上昇がリーフ海域における直立護岸の越波流量に対して大きな影響を及ぼすことを示した。

5. おわりに

本研究では、リーフ長や入射波諸量と関係づけながらリーフ地形上の直立護岸の越波特性について実験的に考究した。その結果、無次元リーフ長  $R/h$  と無次元越波流量  $q/\sqrt{2gH_0^3}$  には、指数関数的な関係があることを示し、リーフ海域において越波流量を算定する際には、リーフ長を考慮する必要性があることを言及した。また、護岸前面での長周期波成分の振幅は、入射波の非線形性および無次元リーフ長とともに増加し、リーフ上に設置された直立護岸の越波流量に影響を及ぼすことを明らかにした。ただし、長周期波成分が及ぼす越波流量の影響に関して、詳細な検討には至っておらず、今後の課題である。

謝辞：本研究の一部は、科学研究費補助金若手研究 (A) (研究代表者：名古屋大学・川崎浩司、課題番号：21686046) および特別研究員奨励費 (研究代表者：名古屋大学・菊雅美、課題番号：2110250) であることをここに付記し、感謝の意を表する。

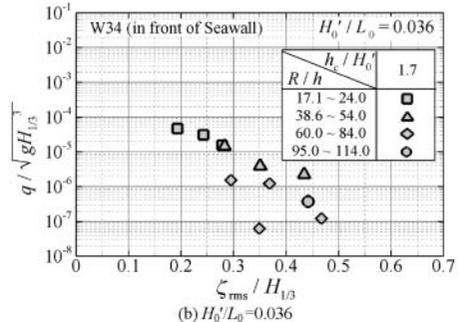
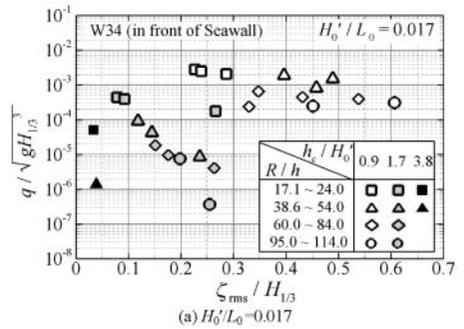


図-8 護岸前面の長周期波成分と無次元越波流量の関係

参考文献

江頭和彦・福田 功・岸良安治・西村達郎 (1985)：リーフによる波浪変形の現地観測，第32回海岸工学講演会論文集，pp. 90-94.  
 川崎浩司・菊 雅美・笹田泰雄・眞栄里和也・内間安治・嶋田 宏・五味久昭・三浦健悟・柴多哲郎 (2008)：海底地形と護岸形状が及ぼす規則波／不規則波動場での海岸護岸の越波特性，海岸工学論文集，第55巻，pp. 831-835.  
 川崎浩司・菊 雅美・眞栄里和也・米須俊彦・嶋田 宏・五味久昭・柴多哲郎・板橋直樹 (2007)：数値波動水路を用いた海岸護岸周辺の越波対策工法の検討，海岸工学論文集，第54巻，pp. 951-955.  
 合田良実 (1975)：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.  
 合田良実・岸良安治・神山 豊 (1975)：不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究，港湾技術研究所報告，第14巻，第4号，pp. 3-44.  
 漁港・漁場の施設の設計の手引検討委員会 (2003)：漁港・漁場の施設の設計の手引，社団法人全国漁港漁場協会，下巻，pp. 798-801.  
 高山知司・神山 豊・菊池 治 (1977)：リーフ上の波の変形に関する研究，港湾技術資料，No. 278.  
 津嘉山正光・河野二夫・仲座栄三・大城真一・福田孝晴 (1995)：リーフ上の波の変形に関する研究，海岸工学論文集，第42巻，pp. 176-180.  
 仲座栄三・津嘉山正光・砂川勇二 (1991)：台風T9021号による歴史的波浪災害の実態調査，海岸工学論文集，第38巻，pp. 926-930.  
 仲座栄三・日野幹雄 (1988)：リーフ地形海岸におけるBore状サーフビートによる災害の実態調査，海岸工学論文集，第35巻，pp. 202-206.  
 The EurOtop Team (2008)：EurOtop - Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual (オンライン)，<http://www.overtopping-manual.com/index.html>，178 p.，参照2009-05-14.