

リーフ上の護岸越波に関する研究

WAVE OVERTOPPING RATE OF A SEA-WALL ON CORAL REEF FLAT

宮国敏秋¹・又吉昭太²・仲座栄三³・宇座俊吉⁴
Toshiaki MIYAGUNI, Shota MATAYOSHI, Eizo NAKAZA and Toshiyosi UZA

¹琉球大学大学院博士前期課程 環境建設工学専攻 (〒903-0213 沖縄県西原町千原1番地)

²世紀東急工業株式会社 (〒105-8509 東京都港区芝公園2-9-3)

³正会員 工博 琉球大学教授 工学部環境建設工学科 (〒903-0213 沖縄県西原町千原1番地)

⁴琉球大学技官 工学部環境建設工学科 (〒903-0213 沖縄県西原町千原1番地)

Overtopping rate of waves over a seawall on coral reef flat is experimentally studied. Through comparisons of overtopping phenomena for seawalls built on a uniformly slopping bottom and on a coral reef flat, it is shown that the wave overtopping for a reef coast is strongly influenced by sea surface raise of surf beat. It is then shown that Goda's design diagrams of wave overtopping rate is not referred for seawall on reef flat.

A new method for the usage of Goda's diagrams for seawall on reef flat is proposed. In the method, not only the wave set-up but the sea water level raise of surf beat on the reef flat is taken to account into the design sea level. It is verified by the comparisons with experimental data.

Key Words : wave overtopping, reef flat, surf beat, wave set-up, coral reef, seawall, design, Okinawa

1. はじめに

沖縄県の海岸のほとんどは、サンゴ礁に取り囲まれたいわゆるリーフ海岸からなる。そうした海岸において、海岸技術者を長年悩まし続けてきているのが、リーフ海岸に建設される護岸の設計手法の問題である。

一様海底勾配とみなせる海岸における護岸は、通常、合田¹⁾ (1977) が与えた算定図を基に設計されている。設計手法の統一性という観点から、リーフ海岸の場合に対しても合田の図表の適用が望まれる。

しかしながら、リーフ海岸上では、伝播波の波高がリーフ上水深のみでなくリーフ先端からの距離によっても異なり、合田の図表の直接的適用が困難となっている。ここに、リーフ上の護岸設計の主たる問題点がある。

これまでの設計においては、中村ら²⁾の改良型仮想勾配法の適用が試みられたり、人工リーフ設計の手引きを基にした算定手法が採用されたりと、様々な工夫を余儀なくされてきている。前者の手法に対しては、何百メートルもの長さにも及ぶリーフ海岸への適用性の問題点が指摘され、後者の場合には周期低減の問題点が指摘されている。

こうした手法に対し、高山ら³⁾ (1987) は、リーフ海岸など複断面海岸に対する護岸越波流量の検討を実験的にを行い、新たな護岸高決定手法の提案を行っている。この手法は、直接実験的に求めた手法

であり、信頼性という観点からは評価されるものとなっている。

しかしながら、この手法は、リーフ先端で必要とされる護岸高を基準とし、それをリーフ長に従いリーフ奥方向に低減させるという手法であるため、リーフ上に障害物等がある場合など、適応性にいくつかの問題点を有する。

本研究においては、実験的にリーフ上の護岸越波特性と通常の一様斜面海岸護岸の越波特性とを明らかにした上で、合田の越波流量算定図の適用を基本とし、リーフ上でも算定可能な護岸越波流量算定手法の提案を行う。また、その算定手法の妥当性を実験値との比較で示す。

2. 実験装置および実験手法

実験には、長さ 27m、深さ 1.5m の2次元造波水槽が用いられた。用いたモデルの縮尺はフルード則に従い、長さの縮尺を 1/100 とした。実験装置およびモデルの概要を図-1に示す。

図示のとおり、実験に用いたモデルはリーフ海岸と一様斜面海岸の2種類である。リーフ海岸の場合、沖縄県内の代表的な海岸を考慮し、リーフフラット上水深を 3cm に設定した上で、リーフ長を 50cm～400cm と変化させた。また、リーフ先端部より沖側の海底斜面を 1/10、海浜勾配を 1/10 とした。

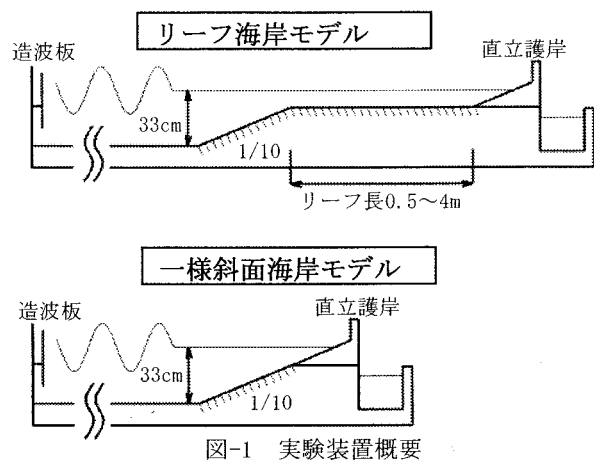


図-1 実験装置概要

直立護岸は、海浜背後に設置することを想定し、許容越波流量が実スケールで $0.0005[\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{s}]$ から $0.08[\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{s}]$ 内に入るように、静水面からの護岸高 h_c を $2.5\text{cm} \sim 12\text{cm}$ と変化させた。

入射波としては、台風時に観測される波を想定し、波高を 8cm 、 9cm および 10cm の3種とし、周期はそれぞれ 1.0 秒、 1.2 秒、 1.4 秒とした。実験では、それぞれの実験波に対して3回計測を行い、ばらつきを考慮して3回の計測値の平均を持って実験値とした。

越波流量の測定では、護岸背後に集水枡を設け、2本の容量式波高計を用いて枡内の水位を測定した。枡内の固有な水位変動を打ち消す目的や枡内の水面擾乱の影響を取り除くため、2本の容量式波高計のデータを平均し、越波流量データとした。

3. 合田の越波流量算定図の利用法

すでに周知のことであるが、実験結果の整理および従来の算定手法と提案する算定手法との相違点を明確にする目的から、合田の越波流量算定手法について若干の説明を加える。

図-2に合田が与えた越波流量算定図の一例を示す。今回実験の対象としたのは、護岸前面海底勾配が $1/10$ の場合当たる。

合田は、越波流量算定に当たり、砕波帯内の波の砕波変形および水位の上昇量を考慮している。さらに、サーフビートの影響をも考慮している。しかしながら、サーフビートの影響は、ある与えられた地点における長周期水位変動として与えられており、長周期波としての伝播特性を持っていない。その点において、実際のサーフビート現象と短周期波とのカップリングは十分に考慮されているとはいえない。こうした点が、これから説明される実験結果との違いでもある。

ここで、合田の越波流量算定図の利用例を具体的に示そう。まず、入射波高を実スケールで 10m とし、周期を 14 秒、沖側静水深 $h_o=33\text{m}$ とすると、換算沖波波高が 11.13 、換算波の波形勾配が

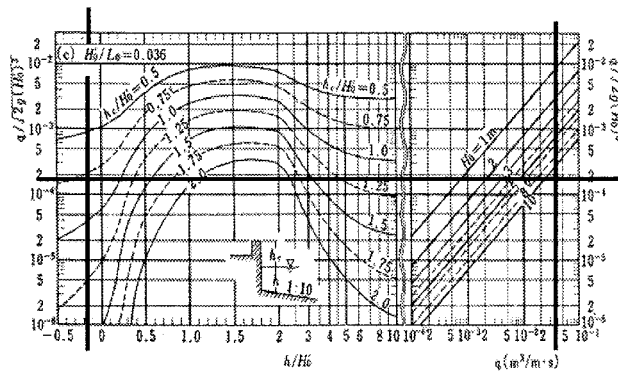


図-2 合田の越波流量算定図¹⁾

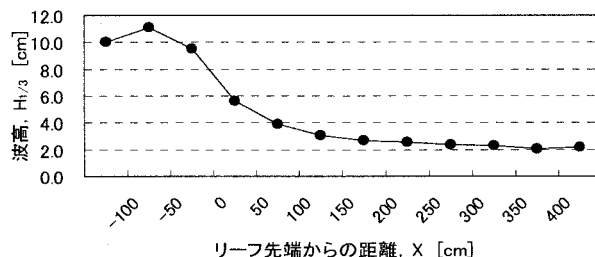


図-3 リーフによる波の変形

$H'o/L_o=0.033$ と求まる。護岸設置位置を海浜背後とし、その水深を $h=-2\text{m}$ とすると、波高水深比が $h/H'o=-0.18$ と与えられる。これらの条件の下に、例えば、必要護岸高を $h_c=9$ と与え、図-2より、無次元越波流量が 0.002 、越波流量が $0.04[\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{s}]$ と与えられる。こうして得られる越波流量が所要の越波流量条件を満たすように、設計上必要となる護岸高が決定される。

この手法をリーフ海岸の場合にそのまま適用しようとするといくつかの問題点が発生してしまう。

まず、図-3に示すように、リーフ海岸に來襲する波浪は、リーフ先端より沖側で砕波したのち、リーフフラット上で漸次減衰する。リーフ先端部付近とリーフ奥では、水深が同じであっても、波高は異なる。図-2に示す合田の越波流量算定図は、換算沖波の条件、護岸設置水深、護岸高の条件のみで与えられているため、リーフの存在による護岸越波流量の違いを表すことはできない。すなわち、護岸高が同じであるなら、リーフ上では、リーフ先端付近であっても、リーフ奥であっても、設置水深に違いはなく、越波流量に違いを出すことができないという問題点を抱えている。

リーフ上の護岸に対しては、リーフ前面の波の緒元を求め、それを換算沖波とみなすことで、合田の算定図が適用できる可能性がある。この時、前面波とは、リーフ上の水面変動波形から長周期成分を取り除いて求められる短周期波となるであろう。また、水位としては、平均水位上昇量と長周期波に伴う水位上昇量とを合わせたものとなることが想定される。

だが、この時、水位上昇として与えなければならない長周期波のもたらす水位上昇とは何であるかが分かっていない。長周期波の平均波高を基準とすべ

きか、あるいは有義波高を参照すべきかなど基本的な事が分かっていない。しかし、最も大事なことは、こうして予測される越波流量が妥当なものであるかどうかさえも未だ明らかにされていない点である。

以下においては、これらの事項が実験的に明らかにされる。

4. 実験結果および考察

一様斜面海岸モデルに対し、実験によって得られた越波流量と合田の越波流量算定図より求めた算定値との比較を図-4に示す。

図中、実線がそれぞれの入射波高に対して合田の算定図より求めた算定値を表す。いずれの入射波に対して、算定値と実験値とは比較的良好な一致度を示している。合田⁴⁾は、算定図から算定される越波流量と実験値との比は、無次元越波流量 $q/\sqrt{2gH^3}$ が 10^{-2} から 10^{-3} の範囲であれば、0.4~2倍程度となるであろうことを報告している。図-4に示す結果は、最も適合度の悪い入射波高 10cm の場合であっても、実験値と算定値の誤差が越波流量比で2倍以下であることを示している。

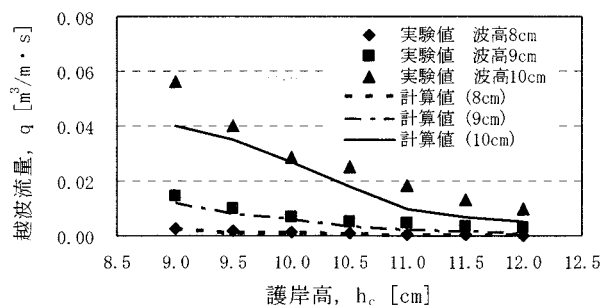


図-4 越波流量の算定値と実験値との比較
(リーフ無し)

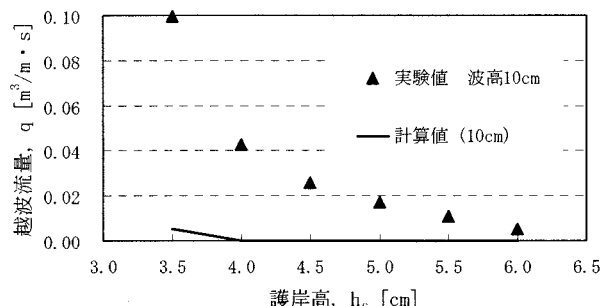


図-5 リーフ上の越波流量の実験値と計算値の比較
(リーフ長 4m)

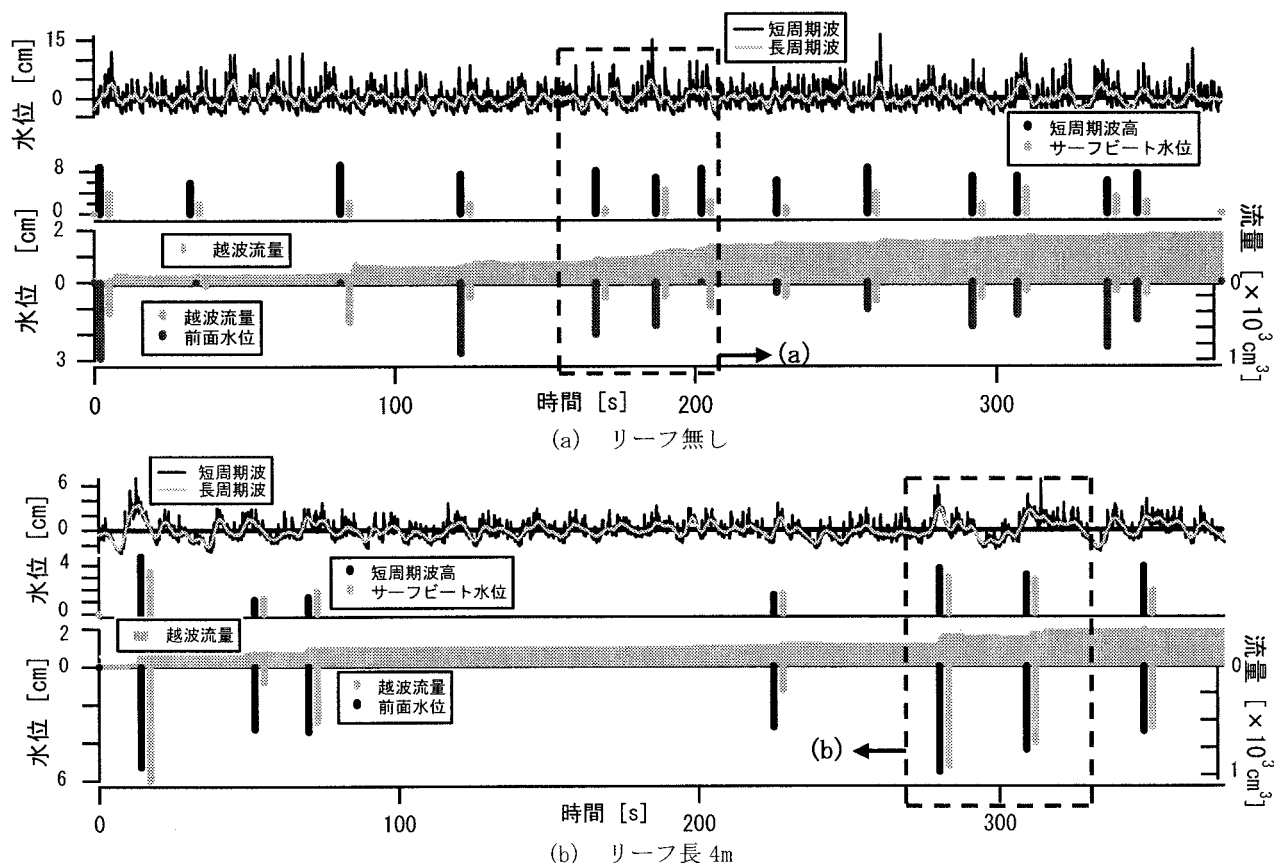


図-6 越波特性の比較

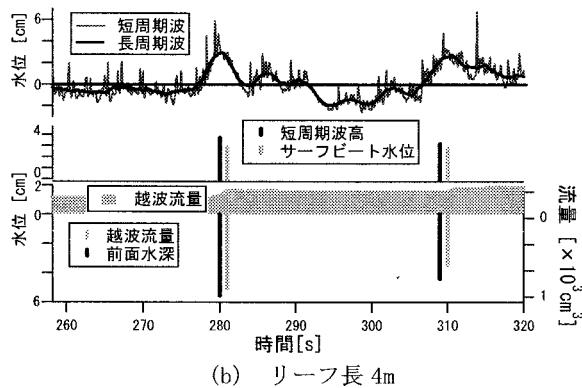
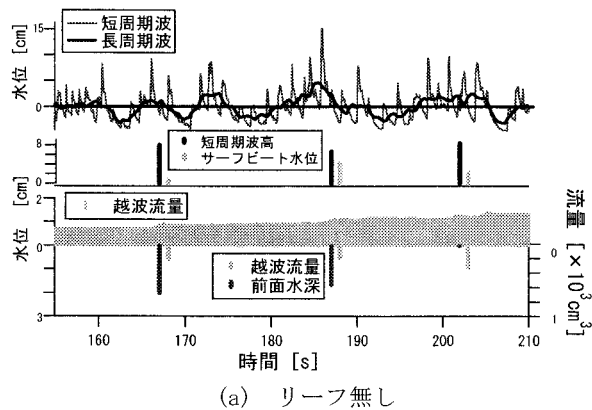


図-7 図-6の破線部の拡大図

適用可能でないことは当然のことであるが、そのことを明確にするため、ここであえて、リーフ上の護岸越波流量に対し、合田の算定図から算定される越波流量と実験値との比較の一例を図-5に示す。

この場合、換算沖波には、堤前面波を用い、静水深を以て設計潮位としている。予想どおり、算定値は実験値を説明するものとはなっていない。その主要原因を探るため、以下に一樣斜面海岸に対する護岸越波特性とリーフ海岸の場合の護岸越波特性の違いについて明らかにする。

図-6に、リーフ長をゼロとした場合の一樣斜面海岸に対する護岸越波特性とリーフ長が4mの場合の護岸越波特性を示す。いずれの場合も平均越波流量は $q=0.015[\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{s}]$ である。図には、上段から順に護岸前面の水面変動波形、サーフビートに伴う水位変動、短周期波の波高、越波をもたらした短周期波をゼロダウクロス法で定義しその波の谷の位相時における護岸前面水位が示されている。

図-6に示す護岸前面波形については、短周期変動と長周期変動とを見分けるのが困難なため、図-6に破線で示す領域を拡大し、図-7に示した。

図-6に示す越波流量の時間的変化について、一樣斜面海岸の場合とリーフ海岸の場合とを比較し、一樣斜面海岸の場合の越波が全体的に短周期的に（頻繁に）越波している様子が伺える。一樣斜面海岸の場合は越波が短周期波の高波高時に生じているのに対し、リーフ海岸の場合は越波の形態がサーフビートに伴う水位に大きく依存している。リーフ海岸の場合、サーフビートの波高に対し、短周期波の

波高が相対的に小さくなるのが越波にサーフビートの影響が大きく現れる要因と考えられる。

5. リーフ上護岸越波算定手法の提案

前章において、リーフ上護岸越波流量の算定に合田の算定図をそのまま適用することの問題点が示された。また、サーフビートに伴う水位がリーフ上の護岸越波に大きく関与することも示された。ここでは、リーフ上の護岸越波流量算定に対し、設計潮位を見直すことで、合田の越波流量算定図が適用可能であることを示す。

合田の越波流量算定図をリーフ海岸の場合に適用するに当り、護岸前面の水位上昇量 $\bar{\eta}$ 、サーフビートに伴う水位の上昇量をリーフ上の静水深 h に加え、それを設計潮位と設定する。次に、堤前面における短周期波の波高および周期をもって換算沖波波高を求める。このとき、周期については、沖波と同じ周期を用いる。

サーフビートに伴う水位上昇量としては、堤前面で与えられる長周期波の有義波高値 $H_{L1/3}$ を用いる。すなわち、サーフビートに伴う水位上昇量は、長周期波の有義波高値の約半分の値が妥当な値として想定される。しかし、そうである保証はないので、一応ここでは、 $a \cdot H_{L1/3}$ で与え、 $a \approx 0.5$ 程度と考える。

以上より、リーフ上の護岸に対する設計潮位 h_d が次のように与えられる。

$$h_d = h + \bar{\eta} + a \cdot H_{L1/3} \quad (1)$$

こうして与えられる設計潮位と堤前面の短周期波を基に、合田の算定図を用い、越波流量が算定されることになる。

ここで、リーフ上の短周期波高および水位上昇量、さらにはサーフビートの波高をどのように求めるかが問題となろう。本研究では、これらの諸量の算定手法を示すことが目的ではない。これらの諸量は何らかの方法で精度良く求まった場合を前提として、それらの条件からいかに護岸設計が可能となるかを示すことが主目的である。したがって、本研究では、実験で得られた諸量が用いられていることに注意を要する。

図-8(a)~(f)に、ここに示す手法で得られた算定値と実験値との比較を、リーフ長が 0.5m から 4m に対し示す。図中、実線が算定図から予測された値である。算定値は、多少のばらつきはあるものの、どのリーフ長に対しても実験値と良く一致していると言え、ここに示す手法の妥当性が示されたと言える。

図-8 で採用された係数 a の値を図-7に示す。係数の値は、リーフ長が増すにつれて若干の増加が見られるものの、ほぼ一様に 0.7 程度の値をとっている。

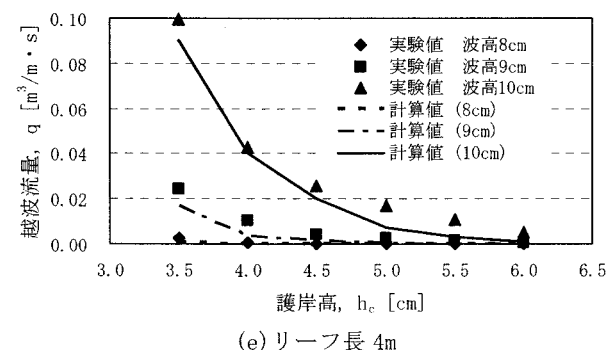
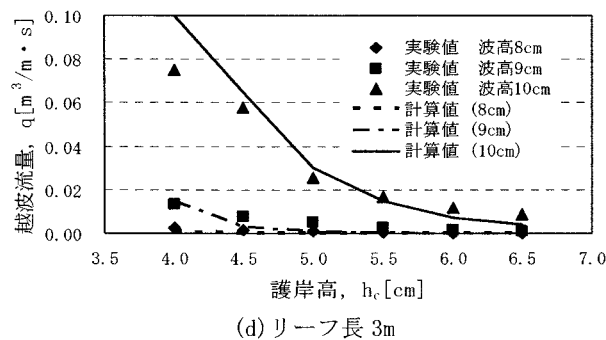
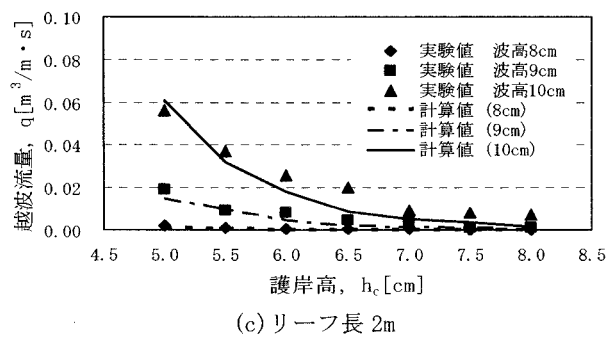
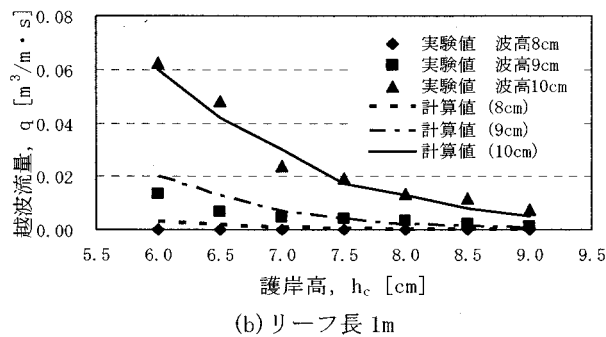
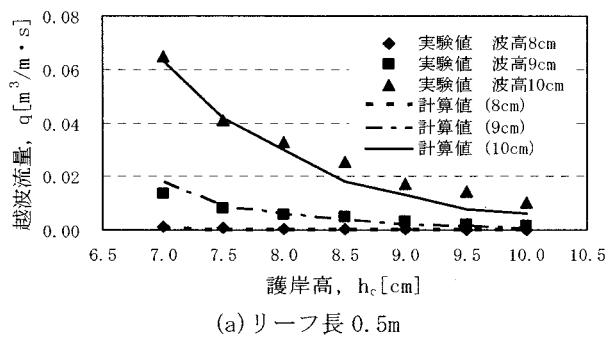
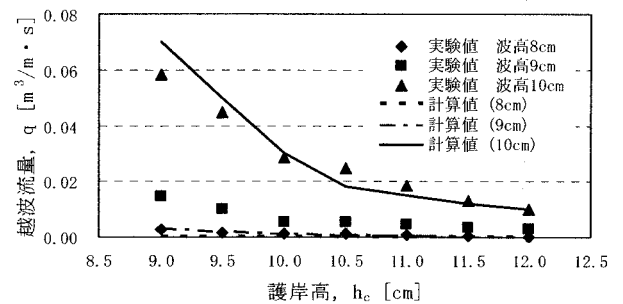
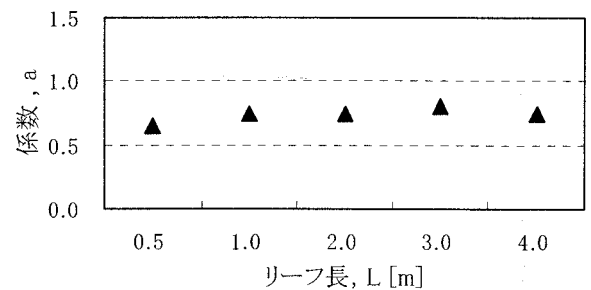


図-8 提案した手法による算定値と実験値の比較



最後に、この手法が一樣斜面勾配の場合にも適用可能であるかどうかを調べる。図-4に示す一樣斜面海岸護岸の実験データに対し、ここに示す手法、すなわち設計潮位を式(1)に示す潮位で与え、堤前面の短周期波を入射波高とみなし、合田の算定図を適用した場合の算定値と実験値との比較を図-10に示す。

図示のとおり、算定値と実験値との整合性は悪い。したがって、ここに提案するリーフ上の護岸越波流量算定手法は、ある程度リーフが存在する場合に適用できる手法であり、一樣斜面勾配の海岸に対しては、合田の算定図をそのまま適用する方が妥当であることが示唆される。その主要原因としては、リーフが存在する場合、碎波後の波がリーフ上を幾分伝播する過程である程度再生し、それを以て堤前面の換算沖波に設定可能であることによるものと判断される。

5. おわりに

本研究においては、リーフ上の護岸越波に関する実験を行い、リーフ上の護岸越波特性を把握した上で、一樣斜面勾配海岸を対象に求められている合田の越波量算定図の利用法について検討した。

その結果、合田の越波量算定図は、一樣斜面勾配海岸に対して良く一致すること、リーフ上の波の変形を考慮し、さらに平均水位上昇量およびサーフビートに伴う水位上昇量を設計潮位に考慮した上で、合田の越波量算定図を適用する方法の提案を行った。その方法に基づく算定値は実験値と非常に良い一致を示した。

リーフ海岸に建設される護岸の設計に対しても、この手法に則り、一様斜面海岸と同じ算定手法に基づき越波流量算定が可能となり、護岸設計手法の統一性が拡張されたと言える。

非線形波動理論および計算機の発達した今日において、リーフ上の護岸越波を数値計算することはさほど困難なことでないのかも知れない。その意味においては、ここに示す研究は、幾分時代遅れの勘もする。しかしながら、数値計算はかならずしも全ての設計者に対してた易いものとは言えず、また現場技術者に対してもた易いものとは言えない。今日でも有義波高の概念がゆるぎなく利用されているように、数値計算に頼らなくとも想像できるもの、あるいは容易に計算可能な手法というのは今後とも求められるものとする。逆に、ここに報告する研究成果がさらに、数値計算等を通し、より見通しのきく算定手法へと発展することを願いたい。

謝辞：本研究を行うに当り、琉球大学名誉教授津嘉山正光、沖縄県農林水産部の川上和宏、比嘉正輝、兼次孝彰より有益なご助言を得た。ここに記し、感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 合田良實，港湾構造物の耐波設計，333p，1977，
- 2) 中村充，佐々木康雄，山田譲，複断面における波の打ち上げに関する研究，第19回海岸工学，土木学会，pp. 309-312，1972，
- 3) 高山知司，古川正美，立石義博，複断面海岸における護岸越波流量に関する模型実験，29p，1987，
- 4) 合田良實，岸良安治，神山豊，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，40p，1975，