

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

Effect of Bottom Topography and Revetment Configuration on Wave Overtopping Characteristics of Coastal Revetment in Regular / Irregular Wave Field

川崎浩司¹・菊 雅美²・笹田泰雄³・眞栄里和也⁴・内間安治⁵

嶋田 宏⁶・五味久昭⁷・三浦健悟⁸・柴田哲郎⁹

Koji KAWASAKI, Masami KIKU, Yasuo SASADA, Kazuya MAEZATO, Yasuji UCHIMA
Hiroshi SHIMADA, Hisaaki GOMI, Kengo MIURA and Tetsuro SHIBATA

The purpose of this study is to investigate the effect of bottom topography and revetment configuration on wave deformation and wave overtopping characteristics around a revetment in regular or irregular wave field by conducting hydraulic model experiments and numerical computations with a CADMAS-SURF. The results revealed that wave deformation over a reef has an effect on wave overtopping rate and a semi-circle type revetment is efficient in reducing wave overtopping rate. It was, therefore, confirmed to be important to consider the wave deformation so as to take countermeasures against wave overtopping in a coral reef sea area. The computational results also showed that the CADMAS-SURF is a useful tool to estimate the wave overtopping rate of specially-shaped revetment over complicated bottom topography.

1. はじめに

台風常襲地域の沖縄諸島では、甚大な高潮・高波による越波被害を恒常的に受けている。特に、主要幹線道路が沿岸に整備されている沖縄本島北部地域では、低気圧の接近・通過時に生じる路上越波によって、長時間に及ぶ通行規制が年数回程度実施されている。通行規制時の孤立人口は数千人に達すると報告されており(内閣府沖縄総合事務局北部国道事務所, 2007)、物流や人々の生活に大きな支障をきたしている。そのため、このような護岸道路に対して早急な防災・減災対策が求められている。また、天然リーフを有する沖縄諸島周辺海域は、谷本ら(1988)が暴浪時の顕著な水位上昇を現地観測により示唆するなど、他の海域よりも複雑な波動場であるため、越波対策面で検討の余地が多く残されている。

一方、1999年の海岸法の抜本的な改正により、近年、従来の直立護岸や消波ブロック被覆式護岸に代わり、環

境や海岸施設利用を考慮した様々な特殊形状護岸の導入が進められている。例えば、フレア護岸(村上ら, 1998)は、来襲波を沖側に打ち返し、越波を低減するだけでなく、護岸天端上の有効活用が可能である。

このような背景に基づき、護岸越波流量を精度よく評価するためには、海底地形による波浪変形や護岸形状を十分に考慮することが重要である。越波流量の算定方法としては、直立護岸および消波ブロック被覆式護岸を対象とした合田(1975)やフレア護岸を対象とした片岡ら(2005)の越波流量算定図の利用が挙げられる。しかし、これらは一様勾配地形を対象としているため、複雑な海底地形に対する護岸越波流量を精緻に評価することは難しい。そこで、川崎ら(2007)は断面2次元数値波動水路CADMAS-SURF(SUPER Roller Flume for Computer Aided Design of MARitime Structure)(財団法人沿岸開発技術研究センター, 2001)を現地リーフ地形に適用し、護岸形状を変化させた越波計算によって、その有用性を示した。しかし、数値波動水路を複雑な海底地形に適用した際の計算結果に対する精度検証までは至っていない。

本研究では、リーフ地形と一様勾配地形に設置された3種類の護岸を取り上げ、規則波のみならず不規則波作用下における護岸周辺の波浪伝播と越波特性について水理模型実験により考究する。さらに、規則波動場に対しては、数値波動水路CADMAS-SURFによる越波計算を実施し、その有用性を明らかにするとともに、越波現象に及ぼす護岸形状の違いについて検討する。

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の断面2次元造波水槽(長さ30m, 幅0.7m, 高さ0.9m)を用いて水理模型実験を行った。本実験では、図-1に示すように、現地海底地形を単純モデル化した2種類の地形を対象に

-
- | | | | |
|---|------|------|-------------------------------------|
| 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 |
| 3 | 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 |
| 4 | | | 内閣府沖縄振興局参事官(振興第一担当)付専門職 |
| 5 | | | 内閣府沖縄総合事務局北部国道事務所調査課調査係長 |
| 6 | 正会員 | | パシフィックコンサルタンツ(株)国土保全技術本部港湾部部長 |
| 7 | 正会員 | | パシフィックコンサルタンツ(株)国土保全技術本部港湾部グループリーダー |
| 8 | 正会員 | | パシフィックコンサルタンツ(株)国土保全技術本部港湾部技師 |
| 9 | 正会員 | 修(工) | 元パシフィックコンサルタンツ(株)国土保全技術本部港湾部技師 |

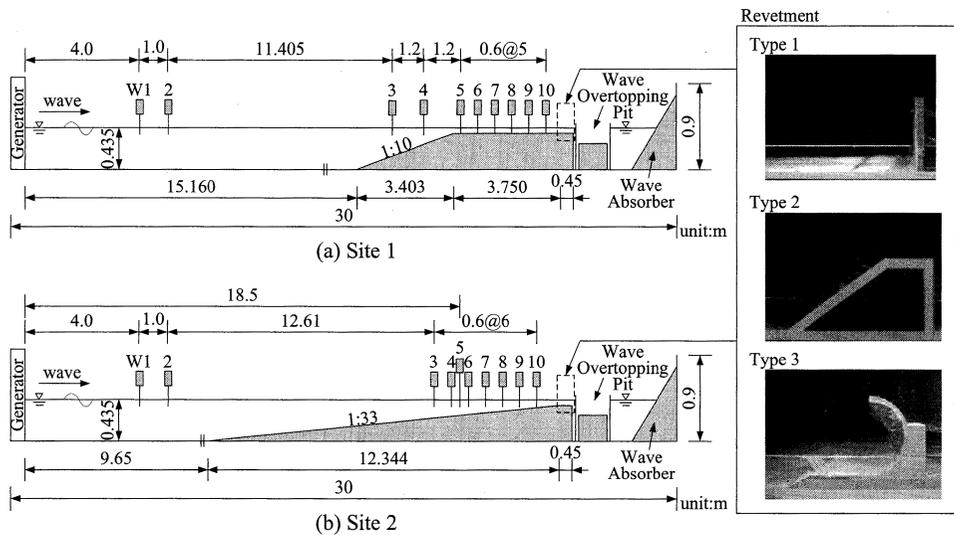


図-1 実験水槽および実験装置

表-1 波浪条件

		Site 1	Site 2
入射波高	規則波 H_0	0.058~0.242m	0.010~0.230m
	不規則波 $(H_{1/3})_0$	0.011~0.182m	0.010~0.145m
静水深 h		0.435m	
周期 T		2.44s	

表-2 計算条件

計算時間	時間間隔	0.0001~0.0003s
	終了時間	50s
造波方法	造波モデル	造波境界
	造波タイプ	流れ関数法B
格子間隔	x 方向	$\Delta x=0.005 \sim 0.02m$
	z 方向	$\Delta z=0.005 \sim 0.01m$

した。図-1(a)に示すSite1は、1/10勾配斜面を前面部に有する一様水深のリーフ地形であり、図-1(b)に示すSite2は、1/33の一様勾配地形である。なお、模型の縮尺は、造波装置の能力、水槽諸元、検討波浪などを考慮して1/40とした。また、護岸形状は、直立護岸(Type1)、消波ブロック被覆式護岸(Type2)、半円弧状護岸(Type3)の3種類とし、天端高 h_c を0.083~0.118mの範囲で変化させた。表-1は波浪条件を示しており、造波板前面の静水深および周期を一定とし、入射波高を変化させながら規則波および修正Bretschneider・光易型のスペクトルに基づく不規則波を作用させた。

本実験では、水面変動量および越波量を測定した。図-1に示すW1~W10の位置に容量式波高計を設置し、サンプリング周波数を100Hzとして水面の時系列変化を計測した。そして、各測点の水面変動量からゼロダウンクロス法によって波高および周期を求めるとともに、平均水位を算出した。なお、測定は同一波高に対して3回行い、規則波実験は20s間、不規則波実験は163.84s間を計測時間とした。また、越波量は、導水板を通じて護岸背後に設置した越波弁に流入した水塊の総重量から算定し、計測時間で除して越波流量を算出した。

表-3 計算ケース

		Site 1	Site 2
入射波高 H_0		0.176m	0.157m
護岸天端高 h_c	Type 1	0.083, 0.115m	0.088, 0.115m
	Type 2	0.083, 0.115m	0.088, 0.115m
Type 3		0.066, 0.089, 0.114m	0.070, 0.093, 0.118m

計算ケースを示す。予備計算として通過波検定を行い、W1における計算波高を実験値と一致させた。なお、その他の計算条件については、川崎ら(2007)を参照されたい。

数値計算では、計算負荷を軽減させるため、直立護岸と消波ブロック被覆式護岸の場合は構造物背後、半円弧状護岸の場合は護岸上部・背後を越波升領域とした。そして、越波升内のVOF関数 F 値を面積積分し、越波量の時系列変化を求めた。計測時間は、第1波目が護岸に到達してから計算終了までとし、総越波量を計測時間で除して越波流量を算出した。なお、数値計算の安定性を向上させるため、越波升領域に初期水位0.01mを与えた。

4. 規則波動場における波浪伝播と護岸越波特性

(1) 波高と平均水位の空間分布

図-2に、半円弧状護岸Type3を設置したときの水面変動量から求めた波高 H と平均水位 $\bar{\eta}$ の空間分布の一例を示す。計算結果は波高と平均水位ともに実験結果とほぼ

3. 数値波動水路CADMAS-SURFによる規則波計算

断面2次元数値波動水路CADMAS-SURFを用いて、規則波実験の再現計算を行った。表-2に計算条件、表-3に

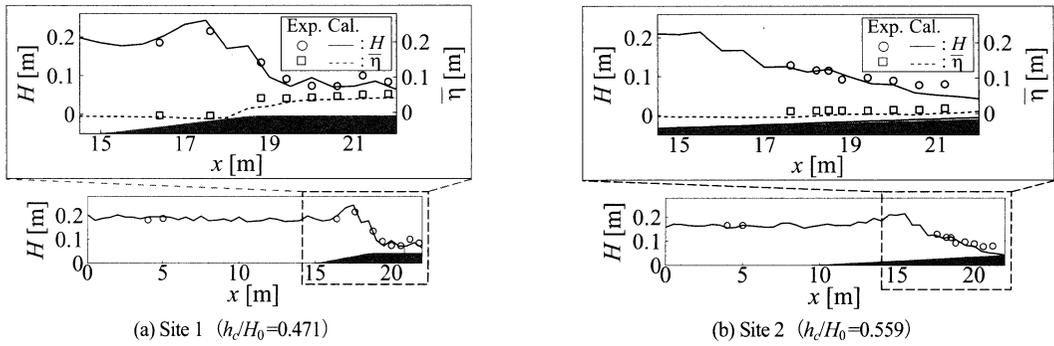


図-2 Type3設置時における波高および平均水位の空間分布

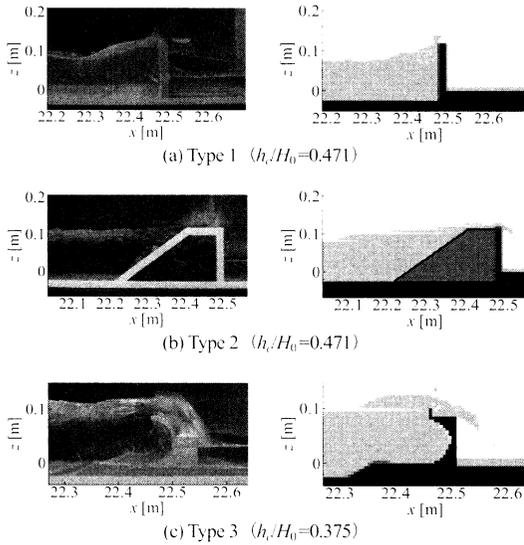


図-3 Site1での越波状況の比較

一致していることがわかる。紙面の都合上図示しないが、表-3の全ケースに対しても同程度の再現性を確認している。また、計算によって得られた水面波形の空間変化から両地形における波浪伝播特性について考察すると、Site1では、礁縁近傍での巻き波砕波によって、波高が大きく減衰する。さらに、リーフ上において、進行波は数回砕波を繰り返し、その後、段波状に護岸前面まで伝播する。図-2(a)に例示するように、この一連の波浪変形・伝播により、リーフ上では波高変化が小さいものの、平均水位上昇が顕著に発生していることが認められる。一方、Site2では、浅水変形によって波高が増大するものの、進行波は一樣斜面上で砕波し、波高を減衰させながら一樣に岸まで伝播する。よって、海底地形の違いが、沖合から護岸までの砕波形態を含む波浪変形特性に大きく影響を及ぼしていることが改めて確認された。

(2) 越波状況および越波流量

図-3に、実験と計算における越波状況の比較を例示する。数値計算は、直立護岸への打ちあがりや消波ブロッ

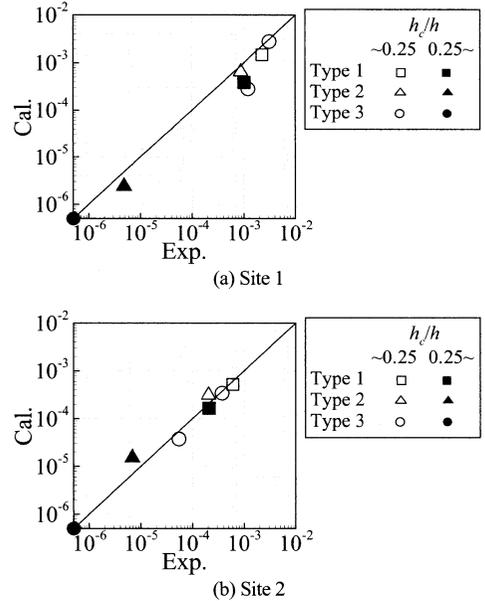


図-4 実験と数値計算による無次元越波流量の比較

ク上への波の遡上、半円弧状護岸の天端上を越流する水塊の状況など各護岸に対する波浪の来襲および越波状況をよく再現している。

図-4は、各地形における無次元越波流量 $q/\sqrt{2gH_0^3}$ について実験値と計算値を比較したものである。計算値は実験値の無次元越波流量を若干過小評価する傾向にあるものの、同程度のオーダーとなっている。したがって、数値波動水路はリーフおよび一樣勾配地形での各種護岸による一連の波浪変形を再現できることを確認した。また、相対天端高 h_c/h の効果を検討するため、 $h_c/h > 0.25$ と $h_c/h < 0.25$ にわけて図中に示した。その結果、本研究で対象とした両地形においては、消波ブロック被覆式護岸と同様に、半円弧状護岸は直立護岸に比べて越波流量に対する相対天端高の効果が大きいことがわかる。よって、半円弧状護岸は有効な越波対策工法の一つといえる。

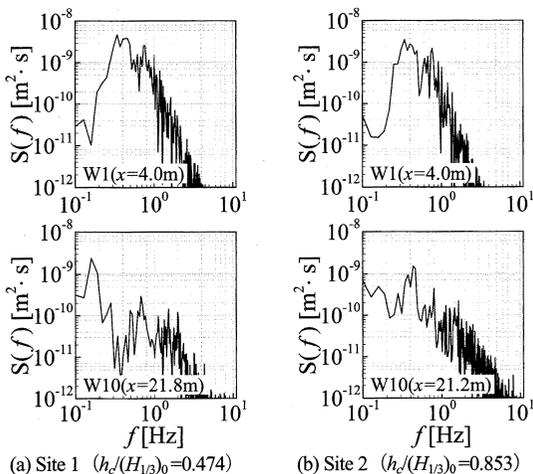


図-5 Type1設置時におけるエネルギースペクトル分布

5. 不規則波動場における波浪伝播と護岸越波特性

(1) 不規則波の伝播特性

図-5に、沖側(W1)および岸側(W10)での水面変動量から得たエネルギースペクトル分布 $S(f)$ を示す。Site1およびSite2とも、W1では有義波周期の第1成分($f=0.41\text{Hz}$)および第2成分($f=0.82\text{Hz}$)の周波数帯付近にピークが出現している。しかし、W1とW10のスペクトル形状は大きく異なっており、特に、図-5(a)に示すSite1では、W10において、有義波周期の第1成分が大幅に減衰している。これは、図-5(b)に示すSite2でのスペクトルにはみられない傾向であり、礁縁付近での碎波とリーフ上での繰り返し碎波によって入射波のエネルギー伝播特性が大きく変化することを意味している。また、Site1、Site2ともに、W10において長周期波成分がみられるものの、特にSite1では顕著である。よって、リーフ地形は、一様斜面地形に比べて長周期波成分が発生しやすいと推察される。ただし、本実験では、波の周期とリーフ長を固定しており、リーフ長と波長の共鳴関係による長周期波成分の発達については十分な議論ができないため、今後に残された重要な検討課題である。

(2) 越波流量に及ぼす海底地形の影響

Site1に設置した直立護岸に対し、越波流量算定図から算出した越波流量と不規則波作用下における実験結果を比較することにより、リーフ上での波浪変形・伝播が越波流量に及ぼす影響について検討した。ここでは一様水深部を考慮せず、リーフ前面の斜面勾配から、海底勾配を1/10として越波流量を算出した。その結果、図-6に示すように、相対天端高の増加に伴って両者の差は大きくなることわかる。すなわち、天端高が大きく、沖波波高が小さくなるほど、リーフ上での波浪変形が越波特性に大きな影響を及ぼすといえる。よって、当然ながら、リーフ地形を対象とした越波流量の算定には、リーフ上

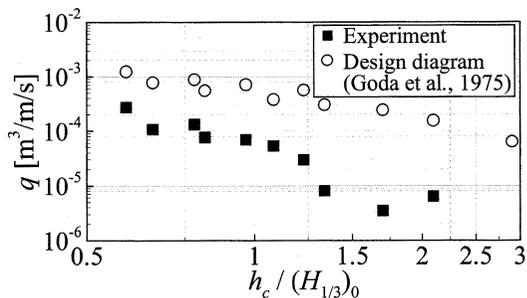


図-6 Site1における越波流量の比較

の波浪変形を考慮することが必須である。このことは、リーフ地形に対する越波流量算定の手段として数値計算が活用可能であることを示唆するものである。

(3) 越波流量に及ぼす護岸形状と入射波特性の影響

図-7および図-8は、入射波を変化させたときの各護岸における無次元越波流量を示している。図-7から、Site1では護岸形状に関わらず、同一相対天端高に対する規則波および不規則波作用下の越波流量に顕著な差異がない。これは、リーフ上では繰り返し碎波によって護岸前面における波高が頭打ちとなるためである。したがって、リーフ地形における越波流量は入射波特性よりも、リーフ上での繰り返し碎波に支配されるといえる。

一方、図-8に示すように、Site2では同一相対天端高に対する不規則波作用下の越波流量は、規則波作用下に比べて大きい。護岸設計における越波量の算定には不規則波を用いるのが原則であるものの、不規則波を対象とした越波計算は多大な時間を要する。そのため、ここでは規則波計算を行い、不規則波作用時と同等の越波流量を算定可能かどうか検討する。川崎ら(2007)は、リーフ地形において波高を多数変化させた越波計算を、数値波動水路によって行い、不規則波中の波高の出現確率も考慮することにより越波流量の期待値(期待越波流量)を算出した。また、この場合、期待越波流量と同等の越波流量が得られる規則波の入射波高が1/10最大波高 $H_{1/10}$ であることを示した。さらに、本論文では不規則波作用下の越波流量には支配的になると考えられる最大波高 H_{\max} に着目した。具体的に、最大波高 H_{\max} と有義波高 $H_{1/3}$ の関係は $H_{\max}1.8H_{1/3}$ で示されることが多いことから、規則波実験の入射波高 H_0 を最大波高 H_{\max} とみなし、1.8で除することにより、仮想的な入射波の有義波高 $(H_{1/3})_0 (=H_0/1.8)$ とした。仮想的な有義波高に対する無次元越波流量を図-8中に×で示したところ、護岸形状に関わらず、不規則波の実験結果とほぼ一致した。この結果を検証するため、不規則波実験の有義波高 $H_{1/3}$ に対する最大波高 H_{\max} の規則波を作用させて数値計算を行ったところ、本実験の範囲においては両者の越波流量はほぼ合致することが確認された。ただし、ここでは規則波計算を行っていることから、不規則波作用下時に発達する長周期波成分などについて考慮できず、詳細な検討は今後の課題である。

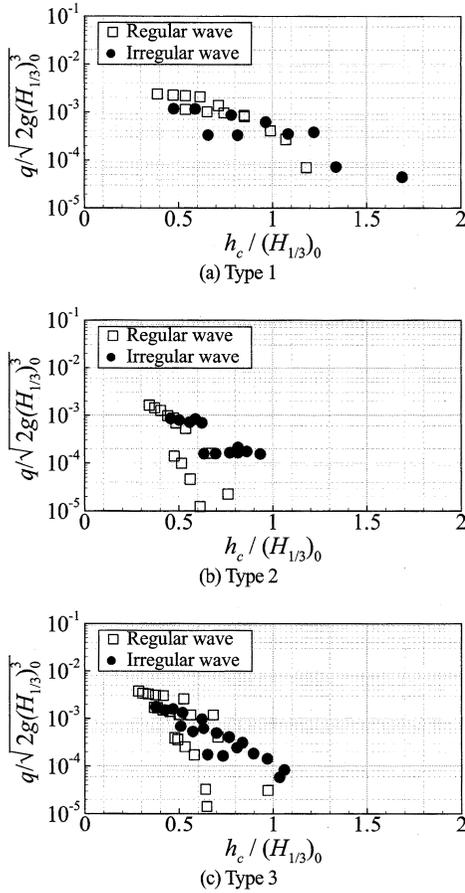


図-7 Site1での無次元越波流量の比較

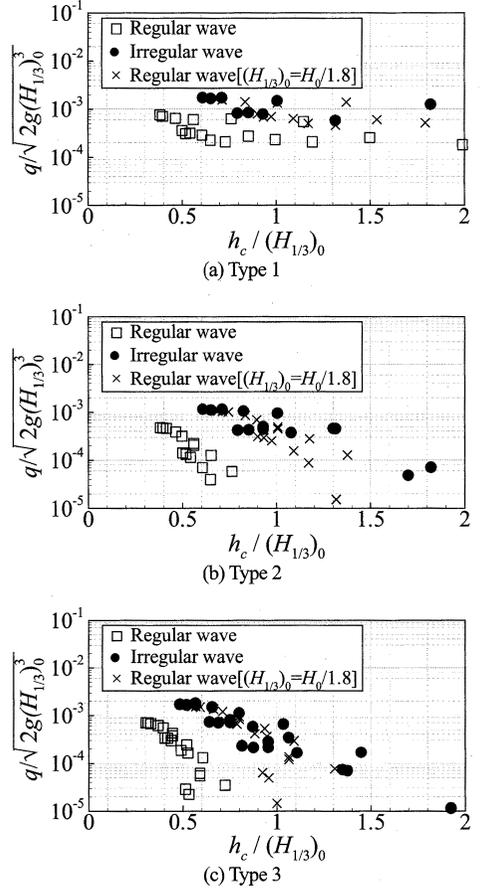


図-8 Site2での無次元越波流量の比較

6. おわりに

本研究では、規則波および不規則波による水理模型実験により、海底地形や護岸形状が越波流量に及ぼす影響について考究した。その結果、前面にリーフ地形を有する護岸では、リーフ上での繰り返し砕波による波浪変形が護岸の越波特性に大きく影響を及ぼすことを明らかにした。また、半円弧状護岸はリーフ地形においてもその効果を発揮することがわかった。しかし、不規則波浪に伴うリーフ上での長周期波の発生機構や長周期波が護岸周辺の越波特性に及ぼす影響について、本論文で言及するまでには至っていない。これらの課題については、今後、詳細な水理模型実験および数値計算を実施し、検討する予定である。

参考文献

片岡保人・塙 洋二・竹鼻直人・奥村昌好・村上啓介(2005)：

フレア護岸の実海岸への設置を考慮した水理実験，海洋開発論文集，第21巻，pp.529-534。
 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・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。
 財団法人沿岸開発技術研究センター(2001)：数値波動水路(C ADMAS-SURF)の研究・開発，沿岸開発技術ライブラリー No.12，457p。
 谷本修志・中野泰雄・大月和義・宇多高明・小俣 篤(1988)：沖縄県仲泊地区のリーフ周辺での波と流れの観測，第35回海岸工学講演会論文集，pp.207-211。
 内閣府沖縄総合事務局北部国道事務所(2007)：沖縄県北部地域における道路行政の平成18年度達成度報告書/平成19年度業績計画書(オンライン)，http://www.dc.ogb.go.jp/hokkoku/douro_ir/gyouseki/img/19gyouseki.pdf，参照2008-02-07。
 村上啓介・上久保祐志・入江 功・香月 理・片岡保人・中岡威博(1998)：低天端消波工による非越波型防波護岸に作用する衝撃波圧の低減，海洋開発論文集，第14巻，pp.375-380。