

# 現地リーフ地形における波浪変形と 護岸周辺の越波に関する数値解析

## NUMERICAL ANALYSIS OF WAVE DEFORMATION OVER THE FIELD REEF AND WAVE OVERTOPPING ON REVETMENT

川崎浩司<sup>1</sup>・菊 雅美<sup>2</sup>・嶋田 宏<sup>3</sup>・柴多哲郎<sup>3</sup>・板橋直樹<sup>3</sup>・馬淵幸雄<sup>4</sup>  
Koji KAWASAKI, Masami KIKU, Hiroshi SHIMADA, Tetsuro SHIBATA  
Naoki ITABASHI and Yukio MABUCHI

<sup>1</sup>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 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

<sup>2</sup>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 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

<sup>3</sup>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 (〒206-8550 多摩市関戸1-7-5)

<sup>4</sup>正会員 パシフィックコンサルタンツ(株) 東北支部水工技術部 (〒206-8550 仙台市若林区新寺1-4-5)

Wave overtopping-caused disasters have occurred around revetments in Okinawa islands, which are one of the typhoon-prone areas in Japan and are mainly surrounded by coral reefs. To take countermeasures against wave overtopping are important from the viewpoint of disaster prevention and the design of coastal structures. The main purpose of this study is, therefore, to numerically examine wave deformation over a natural reef and wave overtopping around a road revetment in main Okinawa Island using a two-dimensional numerical wave flume "CADMAS-SURF". The numerical results reveal that the CADMAS-SURF is able to simulate wave deformation over the reef including wave breaking and wave overtopping around the revetment appropriately and wave overtopping characteristics are greatly affected by bottom topography in front of the revetment. In addition, two methods to estimate the wave overtopping quantity are proposed in this study. The time variations of the wave overtopping quantities calculated by the two methods are found to be similar in the case of large overtopping quantity.

**Key Words :** Wave overtopping, Wave deformation, Natural reef, CADMAS-SURF

### 1. はじめに

我が国では、海岸線沿いに主要幹線道路が発達しており、これに付随して海岸防災施設の整備も進められてきた。しかしながら、台風や低気圧の接近時に、道路護岸周辺において飛沫による運転者の視界不良、交通規制に伴う地域間の交通遮断、道路に隣接する民家への人的・物的被害など、越波被害を受ける地域は今日においても後を絶たない。そのため、人命・財産保護の観点から、海岸線沿いの主要幹線道路に対して越波対策を講ずることは極めて重要である。一方、台風の常襲地域である沖縄諸島海域では、低気圧接近時に写真-1に示すような越波による被害を受けている。沖縄諸島海域には、天然リーフが発達しており、リーフ上での複雑な波浪変形によって、護岸周辺の越波特性は他の海域に比べてより複雑になるため、検討の余地が多く残されている。したがって、沖合から伝播する波の変形を考慮し、護岸周辺の越波特性を究明することは、防災面、設計面において必須である。

これまで沖縄諸島海域の天然リーフを対象とした研究として、仲座ら<sup>1), 2)</sup>は、現地観測によってリーフ上の波浪特性を把握し、砕波によって生じる水位上昇やサーフビートなどの波浪変形を考慮した設計波高について言及している。一方、津嘉山ら<sup>3)</sup>は規則波を、磯部ら<sup>4)</sup>は不規則波を対象に、水理模型実験によりリーフ前面勾配による水位上昇量への影響について研究を行っている。このように、従来から、現地観測や水理模型実験によってリーフ上の波浪変形に関する研究は多く実施され、有益な知見が得ら



写真-1 越波状況

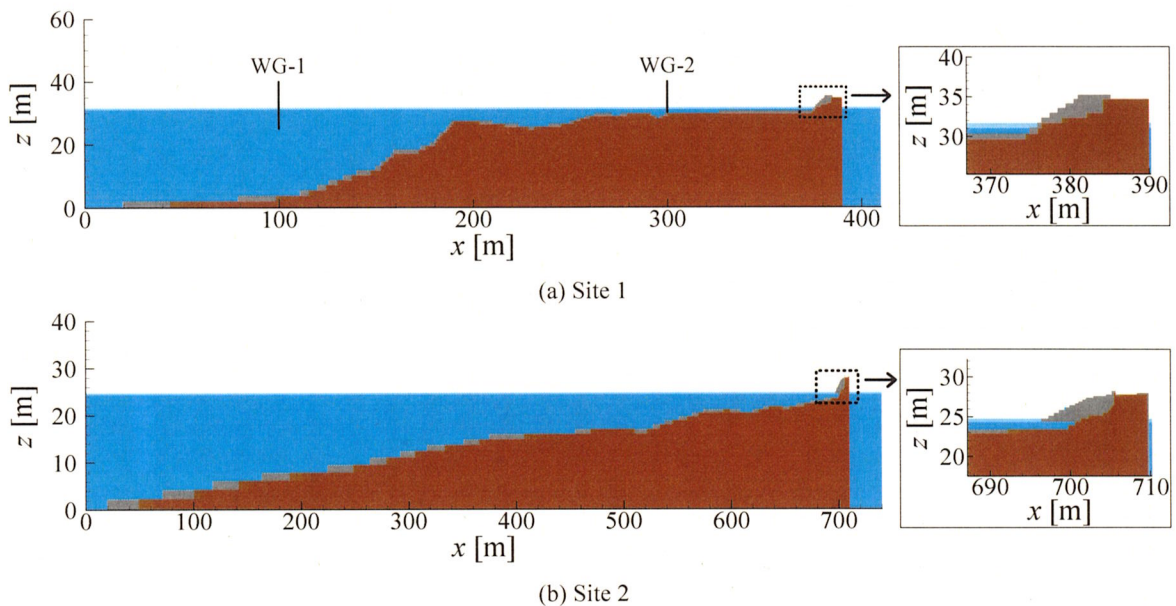


図-1 対象解析地形および解析領域

れている。しかしながら、砕波を伴うリーフ上での波浪変形が護岸背後への越波に及ぼす影響に関しては、体系的に取り扱っている研究は少ない。さらに、護岸背後への越波の原因は、リーフ上での波変形に加え、沖波や海底勾配、海岸構造物の形状・設置水深など数々の要素に影響されるため、越波対策を図る際には、当該地域において種々の条件下での検討が必要となる。一方、近年、計算機の高速化に伴い、砕波や越波などの複雑な波浪変形を精度よく解析可能な数値解析手法が開発・提案され、実務においても数値計算が活用されつつある。

本研究では、越波被害を受けている地域の越波対策を図るため、2次元数値波動水路CADMAS-SURF (Super Roller Flume for Computer Aided Design of Maritime Structure) を沖縄諸島海域のある現地海底地形に適用し、リーフ上を伝播する波の変形と護岸背後への越波現象について数値的に把握し、その有用性を検討することを目的としている。

## 2. 現地リーフ地形への数値波動水路の適用

### (1) 数値波動水路CADMAS-SURFの概要

本研究では、数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会で開発された2次元数値波動水路CADMAS-SURF<sup>5)</sup>を用いた。CADMAS-SURFは、透過性構造物のみならず、複雑な形状をもつ不透過性構造物と波の非線形干渉による波浪場を解析でき、海岸・海洋構造物の耐波設計に適用可能な断面2次元数値波動水路である。CADMAS-SURFでは、非圧縮性流体に対する連続式、ポーラスモデルに基づいて拡張されたNavier-Stokes方程式を基礎式として

いる。さらに、自由表面の取り扱いには、汎用性が高く、複雑な水面形状の時間変化が解析可能なVOF (Volume Of Fluid) 法を採用している。具体的には、セル内における流体の体積率を表すVOF関数の移流方程式をdonor-acceptor法で解く手法である。

CADMAS-SURFによる計算結果の精度検証は、磯部ら<sup>6)</sup>をはじめ、これまで水理模型実験との比較が実施されており、越波現象に関しても、中野ら<sup>7)</sup>や佐貫ら<sup>8)</sup>によって、精度よく現象を再現できることが示されている。

### (2) 解析領域および波浪条件

本研究では、低気圧接近時に越波被害を受けた地域のうち、図-1に示す2箇所の現地海底地形を計算対象とした。図-1(a)に示すSite 1は、 $x=180\text{m}$ 付近の礁縁から岸側にリーフが広がっており、その前面に急斜面を有する典型的な沖縄諸島海域の地形である。一方、図-1(b)に示すSite 2は、約1/35勾配の比較的緩やかな海底勾配を有する地形である。なお、両地形において、護岸前面に消波ブロックが設置されている。本計算では、海岸護岸周辺の越波現象およびリーフ上での波浪変形を高精度かつ効率的に解析するために不等間隔格子を採用し、護岸周辺および自由表面付近で格子間隔が最も細くなるように、Site 1では $\Delta x = \Delta z = 0.5 \sim 2.0\text{m}$ 、Site 2では $\Delta x = \Delta z = 0.2 \sim 2.0\text{m}$ の範囲で格子サイズを変化させた。また、リーフ上の波浪変形を把握するため、水面変動から各地点における波高を求めた。なお、越波水塊を集水するため、護岸背後にも計算領域を設けている。

表-1に本研究で行った計算の波浪条件を示す。Case 1-1およびCase 2は、Site 1とSite 2における50年確率設計波を仮定したものであり、検討対象海域の沖波波高から、海底平面地形上での波の屈折と回折

表-1 計算波浪条件

| Case | Site | $h$ [m] | $H$ [m] | $T$ [s] |
|------|------|---------|---------|---------|
| 1-1  | 1    | 31.4    | 14.46   | 16.0    |
| 1-2  | 1    | 31.4    | 7.5     | 9.7     |
| 1-3  | 1    | 32.4    | 7.5     | 9.7     |
| 1-4  | 1    | 31.4    | 7.5     | 16.0    |
| 2    | 2    | 24.6    | 16.05   | 15.39   |

表-2 解析条件

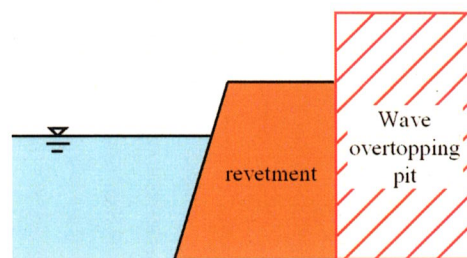
|             |             |     |
|-------------|-------------|-----|
| 計算時間        | 100s        |     |
| 差分スキーム      | DONOR-0.5   |     |
| 造波モデル       | 造波境界        |     |
| 流速・圧力境界条件   | スリップ        |     |
| VOF関数Fの境界条件 | フリー         |     |
| 気泡上昇速度      | 0.2m/s      |     |
| 水滴落下速度      | 3.0m/s      |     |
| 消波工         | 空隙率         | 0.5 |
|             | 慣性力係数 $C_M$ | 1.2 |
|             | 抗力係数 $C_D$  | 1.0 |

の影響を考慮して、入力波高を決定した。また、Case 1-2はSite 1での低気圧接近時の波浪条件を仮想し、Case 1-3、Case 1-4では、Case 1-2に対して、それぞれ潮位、周期を変化させている。なお、実現象の波浪は不規則に変化していることから、本来であれば、本計算においても不規則波を入射させることが望ましい。しかし、不規則波動場を対象とした検討では、有意な統計データを得るために、少なくとも100~200波を作用させる必要があり、多大なる計算時間を要する。そのため、本研究では実務への適用を考慮し、入射波は全て規則波として作用させた。

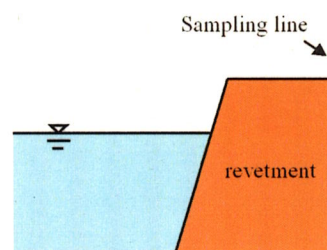
表-2に解析で使用した各パラメータを示す。基礎方程式の移流項の差分にはDONORスキームを用い、VP-DONORを0.2、0.5、0.8と変化した試行計算の結果より、最も安定して計算を行えるVP-DONOR-0.5を採用した。なお、VP-DONORの値は、1次風上差分と2次中央差分の割合を示し、VP-DONOR-0は中央差分、VP-DONOR-1は風上差分となる。したがって、今回採用した値は、風上差分と中央差分が1:1の割合となっていることを意味する。また、碎波によって大量の空気が水中に混入するものの、CADMAS-SURFは単相流モデルであるため、表-2に示すように、TimerDoor法<sup>5)</sup>によって気泡上昇と水滴の処理を行った。護岸前面に設置されている消波ブロックに関しては、消波工内部の空隙率を0.5、慣性力係数を $C_M=1.2$ 、抗力係数を $C_D=1.0$ として計算を行った。

### (3) 越波量の算定方法

護岸背後への越波量は、図-2に例示する2種類の方法を用いて算出し、その時間変化を求めた。図-2(a)に示す越波升による方法では、越波升内のVOF



(a) 越波升による方法



(b) 検査断面による方法

図-2 越波量の算定方法

関数 $F$ の面積積分値を求め、水塊が流入することによって生じるVOF値の変化から越波量を求める方法であり、式(1)で算出される。一方、図-2(b)に示す検査断面による方法は、護岸天端上に検査断面を設定し、通過する水塊の水平流量フラックスを式(2)で示される鉛直積分によって求める方法である。なお、ここでは、前者を $FQ$ 、後者を $UQ$ と定義した。

$$FQ = \iint F_i dx dz - \iint F_{im} dx dz \quad (1)$$

$$UQ = \int F_i u \Delta t dz \quad (2)$$

ここで、 $F_i$ はある時刻におけるVOF関数 $F$ の値、 $F_{im}$ はVOF関数 $F$ の初期値、 $u$ は水平方向流速、 $\Delta t$ は計算時間間隔である。

## 3. 計算結果および考察

### (1) 波浪変形と越波状況

図-3に計算対象領域における水面波形の空間変化を例示する。ここで、(a)および(b)はそれぞれCase 1-1とCase 2を示す。リーフ地形のCase 1-1では、まず、急激な水深変化を伴う礁縁付近( $x=180\text{m}$ )で激しい碎波が起り、その後も進行波は水深の浅いリーフ上で碎波を繰り返しながら、護岸周辺まで伝播する。そして、護岸に到達した大量の水塊は、そのまま護岸背後へと越流する。一方、一様勾配地形を示すCase 2では、 $x=200\text{m}$ 付近で進行波が碎波し、

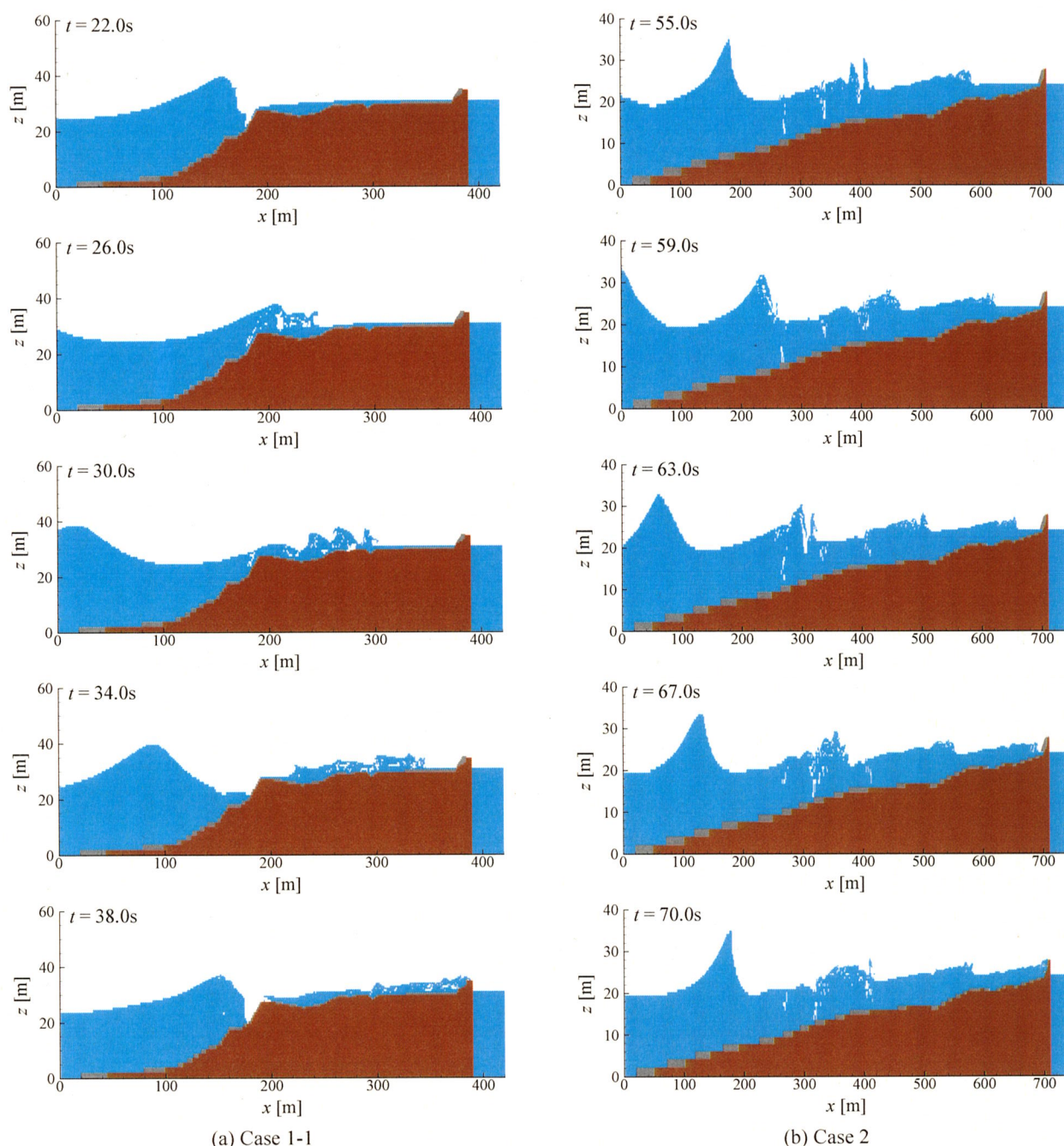


図-3 水面波形の空間変化

波高が減衰していることがわかる。そのため、第1波は護岸周辺に到達するまでに消散し、越波までには至らないものの、数波が到達することによって次第に護岸前面の水位が上昇し、越波が発生する。

図-4に、Case 1-1およびCase 2に対する護岸周辺の越波状況を示す。Case 1-1では、時刻 $t=38.0\text{s}$ に大量の水塊が越流している様子がみられる。一方、Case 2では、時刻 $t=71.0\text{s}$ に越波の発生が確認できるものの、Case 1-1と比べてその量は若干である。また、同図から、水中での気泡混入が確認されるが、前述したように、CADMAS-SURFは気泡挙動を直接計算できないため、気泡上昇といった簡易的な取り扱いで水中内の気泡を処理した。

## (2) 波高分布および水面変動

図-5はCase 1-1とCase 2における波高の空間分布を図示したものである。図-5(a)より、Case 1-1では、礁縁付近での砕波によって波高が急激に減少し、リーフ上において激しく変動している。特に、礁縁で一度減少した波高が $x=300\sim 340\text{m}$ 付近で再び増加している様子がみられ、リーフ上での複雑な波浪変形がうかがえる。Case 2では、海底勾配による浅水変形の影響で波高が増加していくものの、 $x=200\text{m}$ 付近で生じた砕波の影響により、波高は岸付近まで一様に減衰している。したがって、波浪伝播の様子は海底地形によって異なり、リーフ上では波浪変形がより複雑になるといえる。

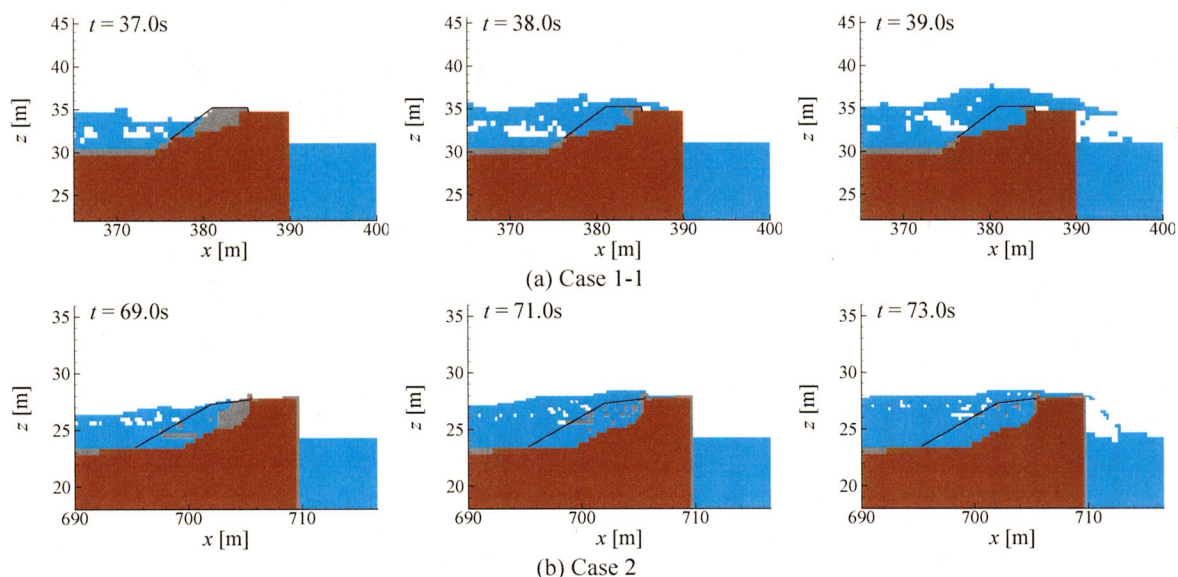


図-4 護岸周辺の越波状況

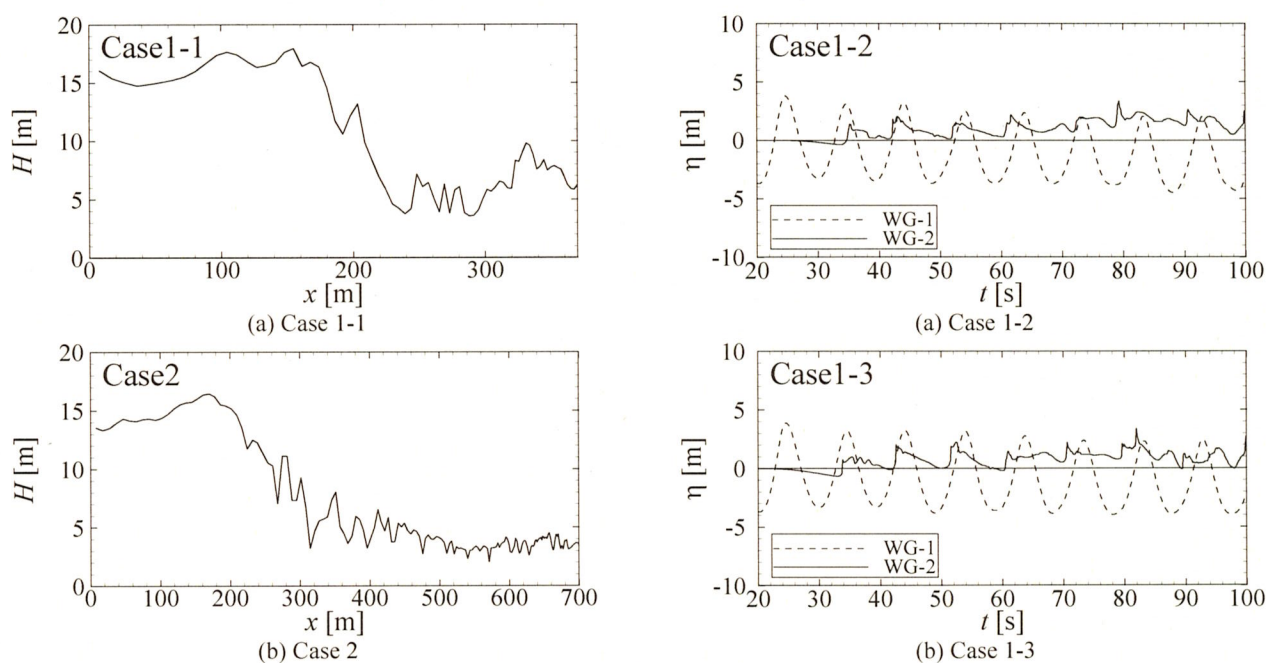


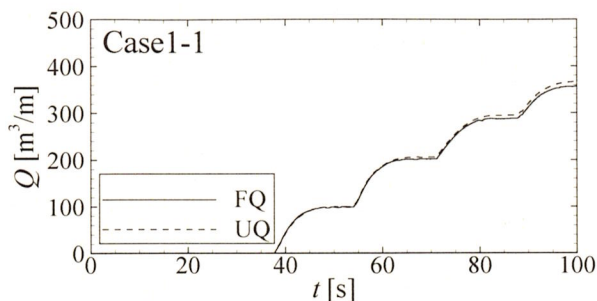
図-5 波高の空間分布

図-6に、波浪条件が異なるCase 1-2～Case 1-4に対する各地点（図-1(a)参照）での水位の時系列変化を示す。同図より、すべてのケースにおいて、リーフ外（WG-1）での規則的な水面変動に対して、リーフ上（WG-2）では波の非線形性が卓越し、水位上昇が顕著にみられる。ただし、Case 1-2～Case 1-4を比較すると、WG-2での水位上昇量に大きな違いはなく、今回の計算範囲ではリーフ上での水位上昇に及ぼす水深や周期の影響はあまりみられない。

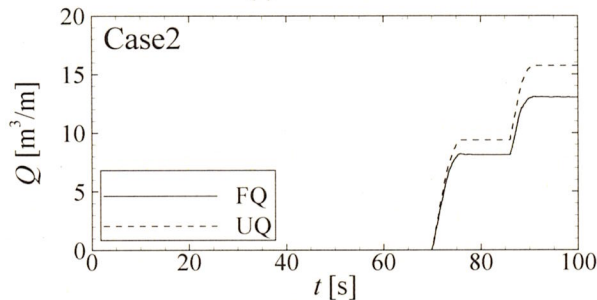
### (3) 越波量

図-7に護岸背後への越波量の時間変化を示す。同図から、入射波が同じ50年確率想定波にも関わらず、

Case 1-1の越波量はCase 2よりもはるかに大きい。このことから、越波量には護岸前面の海底地形の影響が大きく、前面にリーフ地形を有する場合には、一様斜面よりも越波量は大きくなると考えられる。



(a) Case 1-1



(b) Case 2

図-7 越波量の時間変化

また、Site 1での平均越波流量を求めたところ、約  $6.0 \text{ m}^3/\text{m/s}$  となり、護岸被災限界越波流量  $0.1 \text{ m}^3/\text{m/s}$  を大きく上回っていることから、Site 1においては早急に越波対策を講じる方がよいと推察される。なお、図-7において、越波量の大きいCase 1-1では、 $FQ$ と $UQ$ はほぼ一致しているものの、越波量の少ないCase 2では、 $UQ$ が $FQ$ よりも若干増加している。この傾向は、越波量が少ないほど顕著になることを確認しており、規則波および不規則波作用下も含め、越波量の算定方法については、今後検討すべき課題である。

図-8はCase 1-2～Case 1-4における越波量 $FQ$ を比較したものである。図-6では、波浪条件の違いによるリーフ上での水面上昇量への影響はみられなかったものの、越波量に関しては、波浪条件が大きく影響を及ぼすことがわかる。特に、Case 1-4の越波量が最も大きいことから、周期が長くなるほど、越波量も大きくなるといえる。

#### 4. おわりに

本研究では、リーフを有する沖縄諸島海域のある現地海底地形に数値波動水路CADMAS-SURFを適用し、リーフ上を伝播する波浪変形と護岸背後への越波量について数値的に検討した。その結果、リーフ地形と一様斜面地形では、波浪伝播の様子が大きく異なること、リーフ地形では、進行波が礁縁で碎波し、リーフ上でも碎波が繰り返し発生することにより、複雑な波浪場となっていること、波浪条件の

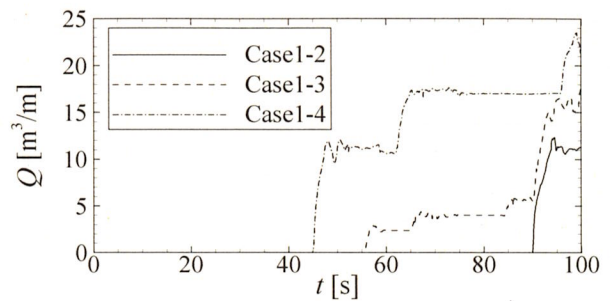


図-8 越波量 $FQ$ の比較

違いが越波量に大きく影響を及ぼすことを確認した。さらに、本研究では越波量算定方法として2種類の方法を提案し、越波量が多い場合には、越波升内のVOF関数 $F$ の面積積分値と検査断面での水平流量フラックスの鉛直積分値による越波量にはほとんど差異がないことがわかった。

以上より、リーフ上および護岸周辺の諸現象に対する数値波動水路の有用性を確認した。ただし、現地では波浪・越波観測が実施されておらず、本研究では実現象との定量的な精度検証までは至っていない。今後、現地観測および水理模型実験を実施し、定量的にも検討する予定である。

#### 参考文献

- 1) 仲座栄三, 津嘉山正光, 田中 聡: リーフ海岸における波・サーフビートに関する研究, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.86-90, 1994.
- 2) 仲座栄三, 津嘉山正光, 玉城重則, 川満康智, 吉田繁, 田中 聡: 湾状リーフ海岸における波・サーフビート, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.281-285, 1998.
- 3) 津嘉山正光, 仲座栄三: 2次元リーフによる波の変形と平均水位変化, 第34回海岸工学講演会論文集, pp.76-80, 1987.
- 4) 磯部雅彦, 柴田洋三, 泉宮尊司, 渡辺 晃: 不規則波によるリーフ上の平均水位上昇に関する研究, 第35回海岸工学講演会論文集, pp.192-196, 1988.
- 5) 財団法人沿岸開発技術研究センター: 数値波動水路(CADMAS-SURF)の研究・開発, 沿岸開発技術ライブラリーNo.12, 457p, 2001.
- 6) 磯部雅彦, 高橋重雄, 余 錫平, 榊山 勉, 藤間功司, 川崎浩司, 蔣勤, 秋山 実, 大山洋志: 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究—VOF法基本プログラムの作成—, 海洋開発論文集, 第15巻, pp.321-326, 1999.
- 7) 中野 修, 興野俊也, 藤井直樹, 榊山 勉, 大熊義夫: 数値波動水路による護岸・防波堤の越波・伝達波の数値計算, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.731-735, 2001.
- 8) 佐貫 宏, 藤田 龍, 関本恒浩, 清水琢三: 数値モデルによる越波量の評価に関する研究, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.736-740, 2001.