

リーフ地形における直立護岸を対象とした 数値波動水路による波浪・越波計算と その精度検証

NUMERICAL COMPUTATION OF WAVE DEFORMATION AND OVERTOPPING
AROUND VERTICAL SEAWALL ON REEF USING NUMERICAL
WAVE FLUME AND ITS ACCURACY VERIFICATION

川崎浩司¹・菊 雅美²・笹田泰雄³
Koji KAWASAKI, Masami KIKU and Yasuo SASADA

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(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

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(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

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(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

The purpose of this study is to investigate wave deformation on a reef and wave overtopping characteristics around a vertical seawall by carrying out hydraulic model experiments and numerical computations with a two-dimensional numerical wave flume based on a VOF method "CADMAS-SURF". The validity and utility of the CADMAS-SURF are, furthermore, verified by comparing with the experimental results.

The comparison of the computational and experimental results reveals that the CADMAS-SURF can reproduce well the experimental results, such as the spatial and temporal variation of free water surface on the reef and wave overtopping rate of the seawall. The results also show that the mean water level increases due to successive wave breaking on the reef and wave set-up remarkably takes place in front of the seawall. The full consideration of the influence of wave deformation is, therefore, found to be important in designing coastal revetments.

Key Words : Numerical computation, reef topography, wave deformation, wave overtopping, hydraulic model experiment, CADMAS-SURF

1. はじめに

我が国で問題となっている沿岸災害の1つとして、高潮・高波に伴う越波災害が挙げられる。台風や低気圧の接近時に道路護岸周辺において発生する越波は、飛沫による運転者の視界不良や道路に隣接する民家への人的・物的被害をもたらすだけでなく、交通規制に伴う地域間の交通遮断を生じさせ、物流や人々の生活に大きな支障をきたしている。

特に、台風常襲地域であり、地域間を結ぶ主要幹線道路の多くが海岸線沿いに整備されている沖縄本島では、越波によって年数回程度の頻度で道路護岸の通行規制が行われている。通行規制時の孤立人口は数千人に達すると試算されており¹⁾、防災面・交通利用面の観点から、このような道路護岸に対して早急な越波対策が求められている。しかしながら、沖縄諸島周辺海域には天然リーフが発達しており、低気圧接近時に異常潮位を観測するなど、リーフ上での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っている。

1999年の海岸法の改正後、単なる護岸天端高の嵩

上げといった防災面のみならず、沿岸の環境や利用の面にも配慮した海岸護岸の設計が求められている。しかし、実務において広く用いられている合田²⁾の越波流量算定図では一様勾配地形を対象としているため、リーフ地形など複合断面地形を対象とした越波流量を精度よく算定することは難しい。

これまで、リーフ地形を対象とした研究は現地観測や水理模型実験などの面から数多く行われ、有益な知見が得られている(例えば、谷本ら³⁾、高山ら⁴⁾、津嘉山・仲座⁵⁾、磯部ら⁶⁾)。しかしながら、前面にリーフを有する護岸の越波特性について取り扱った研究は少なく、未解明の部分が多く残されている。そこで、川崎ら⁷⁾は、沖縄諸島海域の現地リーフ地形を対象に、断面2次元数値波動水路CADMAS-SURF (Super Roller Flume for Computer Aided Design of Maritime Structure)⁸⁾を用いてリーフ上の波浪変形と道路護岸背後への越波特性について数値的な検討を行った。その結果、現地地形への数値波動水路CADMAS-SURFの適用性を定性的に示した。しかし、水理模型実験や現地観測との比較は行っておらず、計算結果の定量的な精度検証には至っていない。一

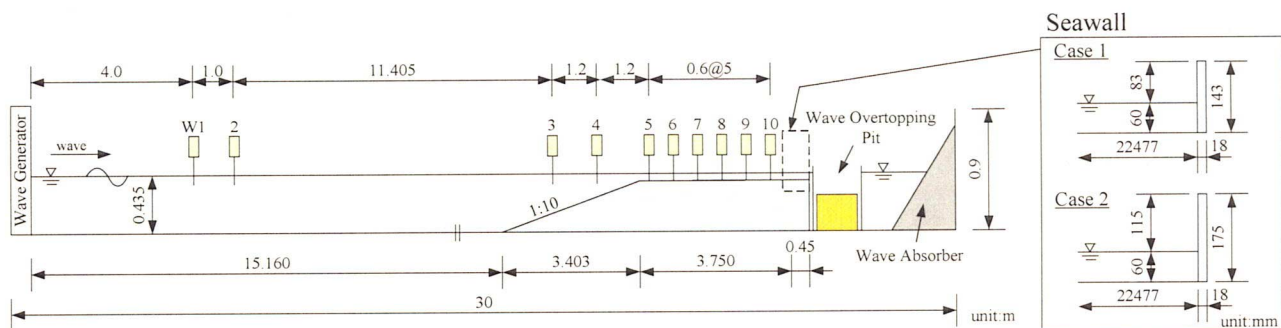


表-1 実験条件

	Case 1	Case 2
護岸天端高 h_c [m]	0.083	0.115
波高 H [m]	0.06~0.222	0.08~0.222
静水深 h [m]	0.435	
周期 T [s]	2.44	

方，リーフ地形に対する数値波動水路CADMAS-SURFの有用性に関しては，高橋・池谷⁹⁾が不規則波浪下における水理模型実験の再現計算を試みている。しかし，数値計算における不規則波の造波方法に課題を残しており，水面変動の時系列に対する妥当性については更なる検討が必要である。

上述の背景に基づき、本研究では、現地リーフ地形を単純モデル化した海底地形を対象に断面2次元造波水槽による水理模型実験を規則波作用下で実施し、数値波動水路CADMAS-SURFの計算精度を定量的に検証するとともに、数値計算と水理模型実験の両面からリーフ地形における直立護岸周辺の波浪・越波特性について考究することを目的としている。

2. 断面2次元造波水槽による水理模型実験

(1) 実験条件

図-1に示す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（幅0.7m，高さ0.9m，長さ30m）を用いて水理模型実験を実施した．実験では，沖縄の実海底地形をもとに前面に1/10勾配斜面を有するリーフ地形を対象とした．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．護岸形状は直立護岸を採用し，天端高 h_c を0.083m，0.115mと2種類変化させた．波浪条件は表-1に示すとおりで，静水深 h と周期 T をそれぞれ0.435m，2.44sと固定し，波高 H を0.06～0.24mの範囲で変化させながら規則波を作用させた．

(2) 実験方法およびデータ解析

本実験では、水槽内の水面変動量と護岸背後への越波量を測定項目とした。水面の時系列変化を記録するため、図-1に示すように、沖側（W1およびW2）と岸側（W3～W10）に計10本の容量式波高計（KENEK製：本体部CH-601、検出部CHT6-40およ

びCHT-30)を設置した。サンプリング周波数は100Hzとし、造波開始から30.48s間にわたって測定した。そして、各測点で計測された水面の時系列変化から、ゼロダウクロス法を用いて波高 H および周期 T 、平均水位 $\bar{\eta}$ を算出した。なお、目標波高を確認するための波高検定地点をW1とした。

越波量の測定は、図-2に示すように、護岸背後の遮水領域内部に設置した越波升を用いて行った。本実験では、幅0.3mの導水板により護岸天端上と越波升を接続し、越波水塊を越波升に流入させた。越波量の計測時間は、造波開始後、波が安定する2波目以降の約20s間とし、再反射波の影響を受けないよう留意した。計測終了後に越波升の重量を測定し、水塊のみの重量を越波量 Q とした。なお、越波量の測定は同一波浪で3回行い、その平均値を取った。また、越波量を計測時間と導水板の幅で除することにより、単位幅あたりの越波流量 q を算出した。

全ての実験ケースにおいて、護岸での波の打ち上がりと護岸背後への越波状況を把握するため、ビデオカメラを護岸付近に設置し、造波開始から終了までの波浪状況を撮影した。

3. 数値波動水路による越波計算

(1) 数値波動水路CADMAS-SURFの概要

本研究で用いた断面2次元数値波動水路CADMAS-SURFは、海域施設の耐波設計に適用することを目的として構築され、実務への適用が積極的に進めら

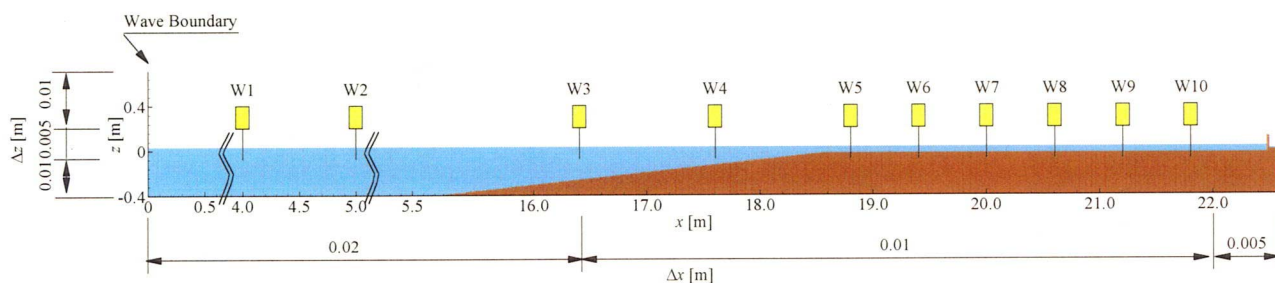


図-3 計算領域

表-2 解析条件

計算時間	間隔 Δt	0.0001s or 0.0003s
	終了時刻	50.0s
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	$\Delta x = 0.005\text{m} \sim 0.02\text{m}$
	z方向	$\Delta z = 0.005\text{m} \sim 0.01\text{m}$
差分スキーム	DONORパラメータ	0.2
TimerDoor法	気泡上昇量	0.2m/s
	水滴落下速度	自由落下
境界条件	速度・圧力	スリップ条件
	VOF関数F	フリー条件

れている数値計算モデルである．数値波動水路CADMAS-SURFでは，2次元非圧縮性流体に対する連続式およびポーラスモデルにもとづいて拡張されたNavier-Stokes方程式を基礎式としている．また，自由表面の取り扱いに汎用性の高いVOF（Volume Of Fluid）法を採用し，VOF関数の移流方程式をdonor-acceptor法によって解くことにより，高精度な自由表面の表現を可能としている．

(2) 計算領域および計算条件

数値波動水路CADMAS-SURFにおける計算領域を図-3に，本計算で使用した各パラメータを表-2に示す．計算領域には，直立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設定した．また，基礎方程式の移流項の差分には，1次精度風上差分と2次精度中央差分の割合が0.2：0.8となるVP-DONOR-0.2を採用した．数値波動水路は単相流モデルであるため，TimerDoor法によるオプションを用いて，気泡の上昇および水滴の落下処理を行った．

数値計算では，W1での計算波高が実験波高と一致するように通過波検定を行った後，水理模型実験と同一条件で越波計算を行った．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．また，計算負荷を軽減させるため，図-4に示すように，護岸背後直後に越波升領域を設けた．そして，次式で示される越波升内のVOF関数Fの面積積分値から越波量の時系列変化を求めた．

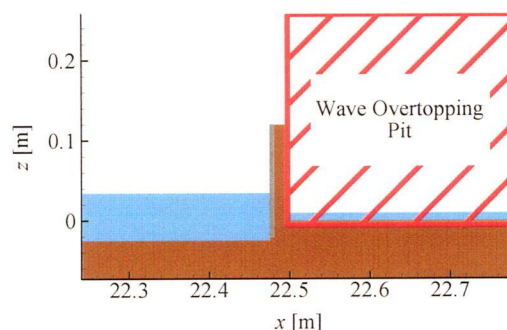


図-4 越波量の算定方法

$$Q = \iint F_t dx dz - \iint F_{m1} dx dz \quad (1)$$

ここに， F_t はある時刻におけるVOF関数F値， F_{m1} はVOF関数Fの初期値である．

4. リーフ地形における波浪伝播と越波特性

(1) リーフ上での波浪伝播

図-5に数値計算によって得られた水面の空間変化を例示する．同図から， $t=6.45\text{s}$ に入射波が礁縁付近（ $x=17.5\text{m}$ ）において空気を巻き込みながら激しく砕波しており，波高が著しく減少している．しかし，その後はリーフ上において砕波を繰り返しながら進行するため，一定の波高を保ちながら岸まで伝播し， $t=7.35\text{s}$ には直立護岸に打ち上がった水塊が護岸背後へと越流している．さらに， $t=7.95\text{s}$ には礁縁付近において沖側へ向かう流速が発達しており，戻り流れの発生が確認できる．これら一連の波浪変形は実験

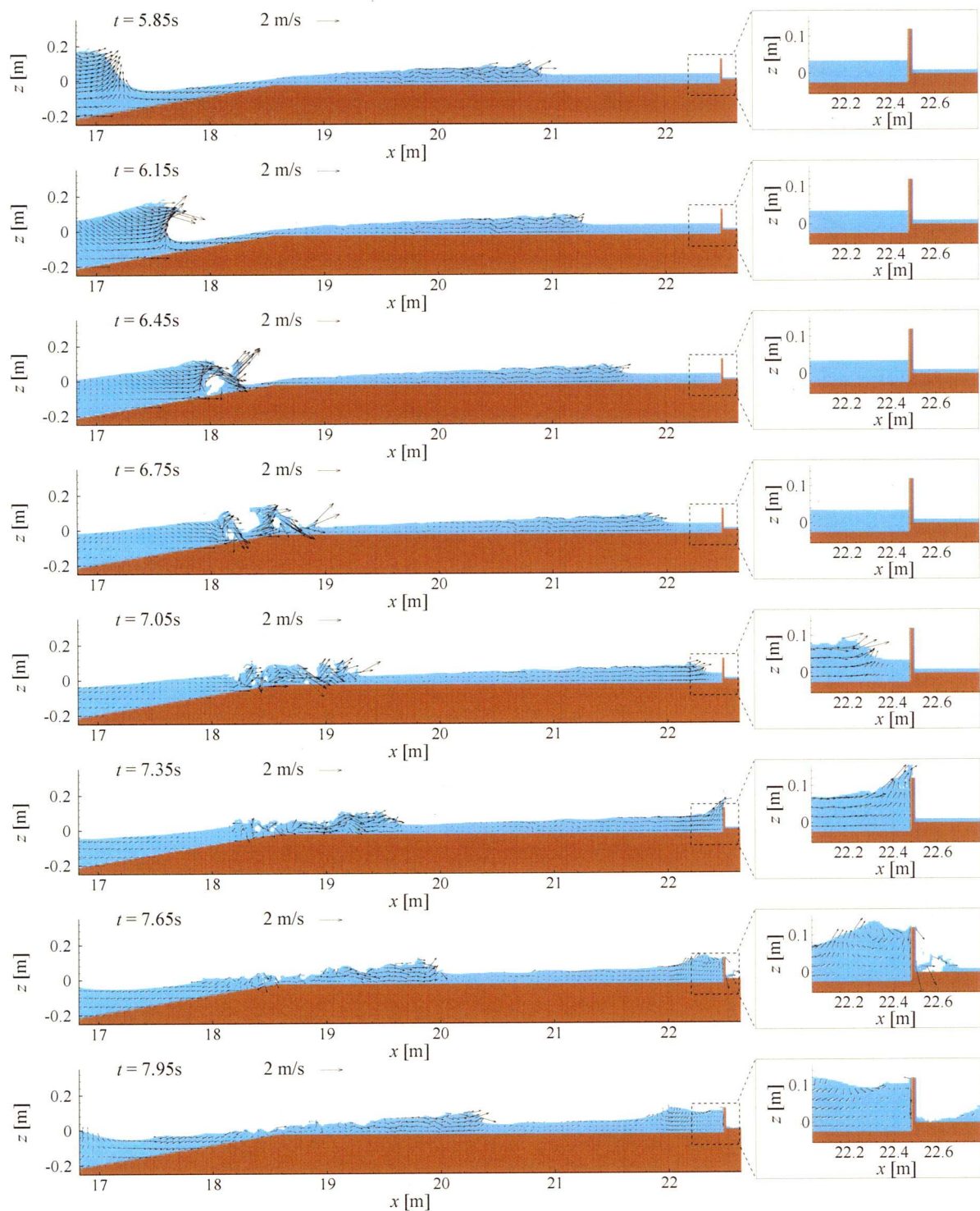


図-5 水面波形の空間分布 (Case 1, $H=0.184\text{m}$)

においても目視およびビデオ画像によって確認しており、数値計算は水理実験をよく再現しているといえる。また、計算結果と実験結果より、リーフ地形の波浪伝播においては、礁縁での砕波とリーフ上での繰り返し砕波の発生が特徴として挙げられる。

図-6は、実験および数値計算によって得られた水面の時系列変化である。計算結果は、波の非線形性が卓越し、最も水面変動が激しい砕波点付近のW4から繰り返し砕波によって複雑な波動場となるリーフ上 (W6～W10) までの水面変動の実験結果を良

好に再現している。また、沖側での規則的な波浪伝播に対し、リーフ上では繰り返し砕波によって入射波の規則性が失われている。

図-7に波高 H および平均水位 $\bar{\eta}$ の空間分布を示す。同図から、礁縁付近での砕波により、急激な波高減衰が確認できる。一方、リーフ上では、砕波を繰り返しながら波が進行していることから、波高変動が明確に認められない。また、砕波点近傍 $x=17.5\text{m}$ にて平均水位が最も低下し、リーフ上では顕著な平均水位の上昇がみられる。また、計算値と実験値を比

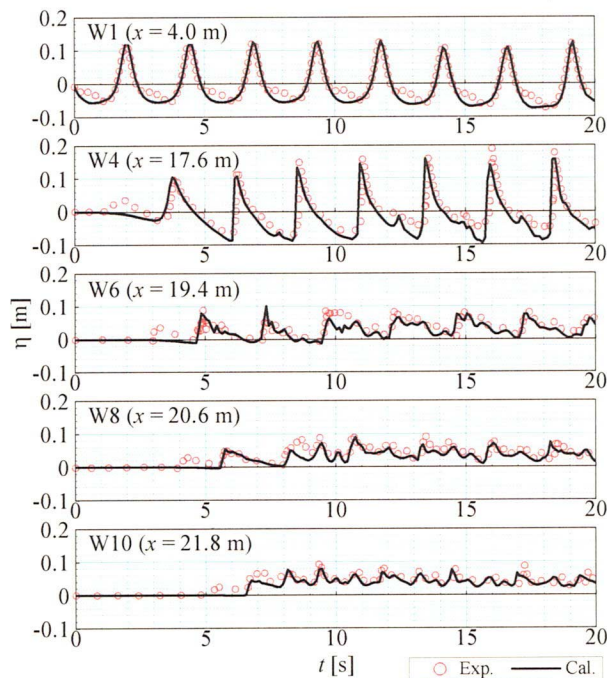


図-6 水面の時系列変化 (Case 1, $H=0.184\text{m}$)

較すると、数値計算は水理模型実験の波浪変形を十分に再現していることから、リーフ地形における直立堤の越波現象に対する数値波動水路CADMAS-SURFの妥当性を定量的に明示することができた。

ついで、斜面上における砕波の再現性を確認するため、次式で示される合田¹⁰⁾の砕波指標による砕波限界波高 H_b と計算結果を比較した。その結果、表-3に示すように、計算値は合田が示した指標値の変動範囲内であり、経験式とほぼ一致していた。

$$\frac{H_b}{h_b} = \frac{0.17}{h_b/L_0} \left\{ 1 - \exp \left[-1.5\pi \frac{h_b}{L_0} \left(1 + 15s^{4/3} \right) \right] \right\} \quad (2)$$

ここに、 h_b は砕波点における水深、 L_0 は沖波波長、 s は水底勾配である。なお、斜面上において砕波が生じているため、水底勾配を1/10とした。

(2) 護岸周辺の越波状況および越波流量

図-8は、水理模型実験の結果にもとづいて、相対天端高 h_c/H_0 と無次元越波流量 $q/\sqrt{2gH_0^3}$ の関係を整理したものである。また、図中には、参考のため、一様勾配1/10に対する既往の越波流量算定図から求めた値を示した。越波流量算定図による結果は一様勾配上の不規則波砕波を対象としているため、両者を単純に比較することはできないものの、リーフ地形における越波流量は、一様斜面勾配地形とは異なり、相対天端高の増大に伴い、急激に減少する傾向が認められる。これはリーフ上での繰り返し砕波による波高減衰が要因として挙げられ、リーフ地形におけ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示している。したがって、沖合にリーフを有する護岸の越波量算定には、リーフ上での波浪変化

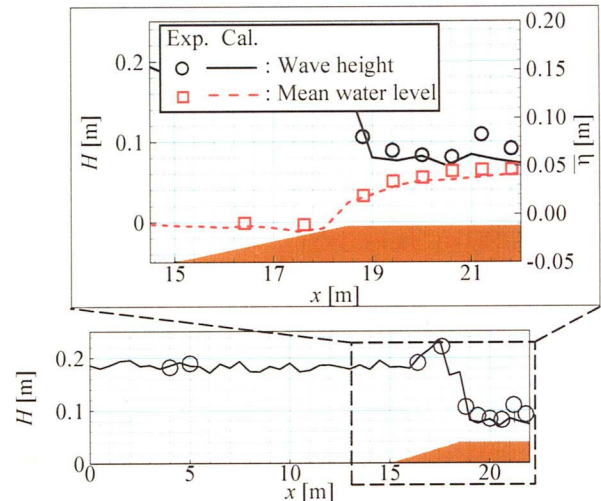


図-7 波高および平均水位の空間分布 (Case 2, $H=0.164\text{m}$)

表-3 砕波限界波高の比較

砕波水深 h_b [m]	0.177
砕波限界波高 H_b [m]	指標 0.20 (14.0%)
	計算 0.23

※()内は変動係数

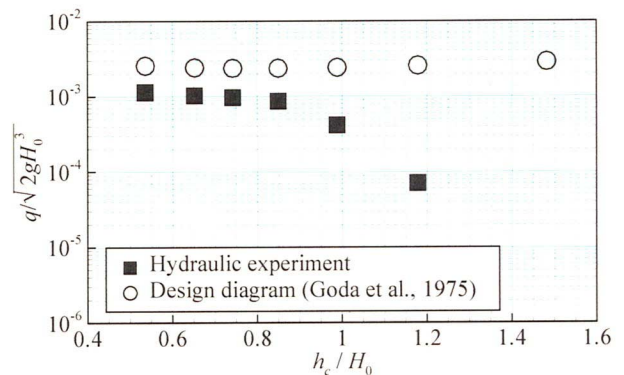


図-8 相対天端高と無次元越波流量の関係 (Case 2)

を十分に考慮しなければならないといえる。

図-9に水理模型実験と数値計算による護岸周辺の越波状況を示す。同図から、数値計算は護岸周辺の波浪変形や護岸への波のうち上がりなど模型実験の越波状況をよく再現している。

数値波動水路CADMAS-SURFによる越波流量の時系列変化を図-10に図示する。図-6に示したように、護岸前面では繰り返し砕波によって波の周期性が明確ではないものの、図-10から越波は規則的に発生していることがわかる。水理実験および数値計算における越波流量の比較を行ったところ、図-11に示すように、計算値は実験値を若干過小評価している。しかしながら、両者は同程度のオーダーに収まっており、越波量および越波流量に対する数値波動水路CADMAS-SURFの計算精度は高いといえる。なお、図中のエラーバーは、実験値の標準偏差を示している。

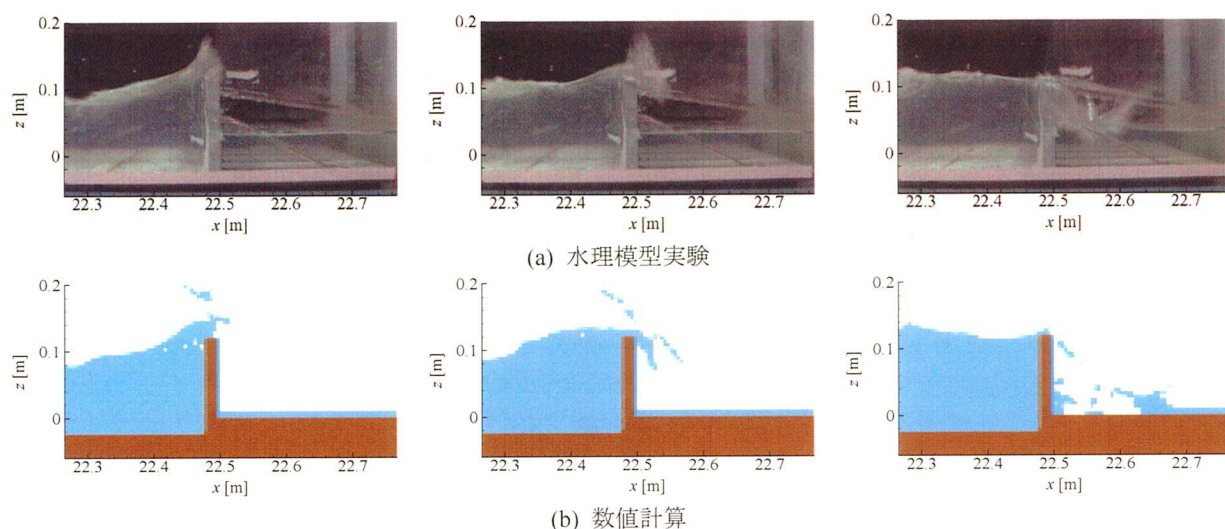


図-9 直立護岸周辺の越波状況 (Case 1, $H=0.184\text{m}$)

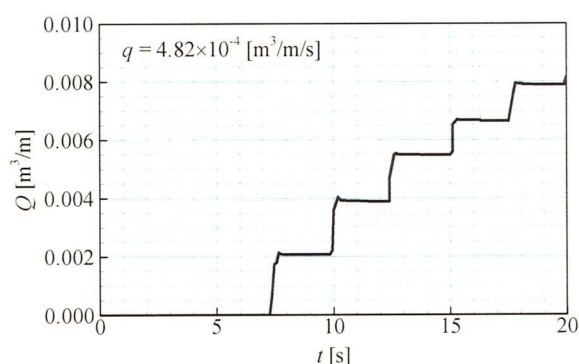


図-10 越波量の時系列変化 (Case 1, $H=0.184\text{m}$)

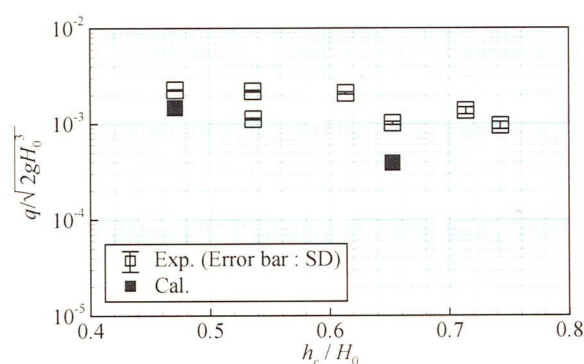


図-11 実験値と計算値の比較

5. 結論

本研究では、沖縄の現地海底地形を単純モデル化したリーフ地形を対象に、水理模型実験と数値波動水路CADMAS-SURFによる計算を行い、リーフ地形における波浪伝播および直立護岸の越波特性について考究し、さらにCADMAS-SURFの妥当性について定量的に検証した。その結果、計算結果と実験結果の比較から、数値波動水路CADMAS-SURFは、水面変動量、波高および平均水位の空間分布、砕波波高、越波流量に対して精度よく再現可能であることを明示した。また、リーフ上では繰り返し砕波によって顕著な波高減衰と水位上昇が発生することが判明し、リーフ上の波浪変形は護岸周辺の越波現象に大きく影響を及ぼすと考えられる。したがって、リーフを前面に有する護岸においては、リーフ上での波浪変形を十分考慮した上で、越波流量を算定することが重要であるといえる。

参考文献

- 1) 内閣府沖縄総合事務局北部国道事務所：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），2007，http://www.dc.ogb.go.jp/hokkoku/douro_ir/gyouseki/img/19gyous
- 2) 合田良実，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，第4号，pp.3-44，1975。
- 3) 谷本修志，中野泰雄，大月和義，宇多高明，小俣篤：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.207-211，1988。
- 4) 高山知司，神山 豊，菊池 治：リーフ上の波変形に関する研究，港湾技研資料，No.278，32 p.，1977。
- 5) 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。
- 6) 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。
- 7) 川崎浩司，菊 雅美，嶋田 宏，柴多哲郎，板橋直樹，馬淵幸雄：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，海洋開発論文集，第23巻，pp.201-206，2007。
- 8) 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.12，457 p.，2001。
- 9) 高橋俊彦，池谷毅：数値波動水路のリーフ上の波浪変形への適用，海洋開発論文集，第16巻，pp.69-74，2000。
- 10) 合田良実：工学的応用のための砕波統計量データの再整理，第54巻，海岸工学論文集，pp.81-85，2007。

eki.pdf, 参照 2008-04-03.