

越波対策護岸の実務耐波設計を目指した 平面・断面2次元モデルの有効活用の試み

ATTEMPT AT EFFECTIVE UTILIZATION OF HORIZONTAL AND VERTICAL
TWO-DIMENSIONAL NUMERICAL MODELS FOR RESISTIVE DESIGN
OF COASTAL REVETMENT AGAINST WAVE ACTION

川崎浩司¹・菊 雅美²・大久保陽介³

Koji KAWASAKI, Masami KIKU and Yosuke OKUBO

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正会員 修(工) パシフィックコンサルタンツ(株) 大阪本社水工技術部(〒541-0052 大阪市中央区安土町2-3-13)

In recent years, CFD (Computational Fluid Dynamics) has been actively employed in order to predict complicated hydraulic phenomena and solve practical problems in coastal engineering, in accordance with the developments of computer performance and high-order numerical schemes. The purpose of this study is to efficiently compute wave deformation and wave overtopping around a revetment on a reef in Okinawa Main Island making use of two different numerical models, namely a depth-averaged numerical model based on a Boussinesq equation "NOWT-PARI" and a vertical two-dimensional numerical wave flume based on a VOF method "CADMAS-SURF".

The numerical results show that NOWT-PARI is capable of simulating wave deformations including wave reflection, refraction and diffraction appropriately. The CADMAS-SURF is confirmed to be able to compute wave overtopping phenomena around the revetment more precisely by setting proper incident wave conditions and bottom topography based on the numerical results by "NOWT-PARI" with due consideration of wave direction.

Key Words : Numerical computation, CADMAS-SURF, NOWT-PARI, wave deformation, wave overtopping, reef topography

1. はじめに

近年、コンピュータの性能向上と水理現象を精度よく再現可能な計算手法の開発に伴い、実務において数値計算の導入が進められている。例えば、VOF法に基づいた断面2次元数値波動水路CADMAS-SURF (SUPER Roller Flume for Computer Aided Design of MARitime Structure)¹⁾は、海岸構造物の耐波設計に適用可能なモデルとして開発され、磯部ら²⁾をはじめとする数多くの研究事例によって、進行波の浅水・砕波変形や越波現象に対する妥当性が確認されている。また、川崎ら³⁾は実海底地形を対象とした道路護岸の越波対策工法の選定にCADMAS-SURFを適用し、その有用性を明らかにした。しかし、実際の海域は複雑な波動場となっており、より詳細な解析を行うためには護岸付近における波の浅水・砕波変形だけでなく、沖合での波の屈折・回折も含めた平面的な波浪変形を考慮する必要がある。

近年、3次元波動場を直接的に計算する3次元モデルの活用が積極的に試みられている(例えば、長瀬・島田⁴⁾、後藤ら⁵⁾、有川ら⁶⁾、川崎・袴田⁷⁾、

Nakamura⁸⁾)。しかし、3次元数値モデルを実海域に適用するにあたっての当面の問題として、計算時間やコンピュータのメモリ容量など計算負荷が挙げられる。特に、越波現象を解明するためには甚大な計算時間を要するため、現時点において実務への3次元数値モデルの適用は難しいと考えられる。

一方、港湾内の波浪変形計算として、高山法やエネルギー平衡方程式など、平面2次元波動場における数値計算手法が確立されている。ただし、前者は波の屈折現象、後者は回折現象を考慮できないため、解析対象に合わせた計算手法の選定が必要である。しかし、リーフ海域など様々な波浪変化が起こる複雑な海域においては、波の浅水変形、砕波変形、屈折、回折などを同時に取り扱うことが望ましい。そこで、平山⁹⁾は、分散特性を改善した修正Boussinesq方程式によって、波の屈折と回折を同時に解析可能な平面2次元数値モデルNOWT-PARI (Nonlinear Wave Transformation model by Port and Airport Research Institute)を開発した。NOWT-PARIは平面波動場における水位変動と流速変動を直接計算することによって計算領域内の波高分布や沿岸域の波・

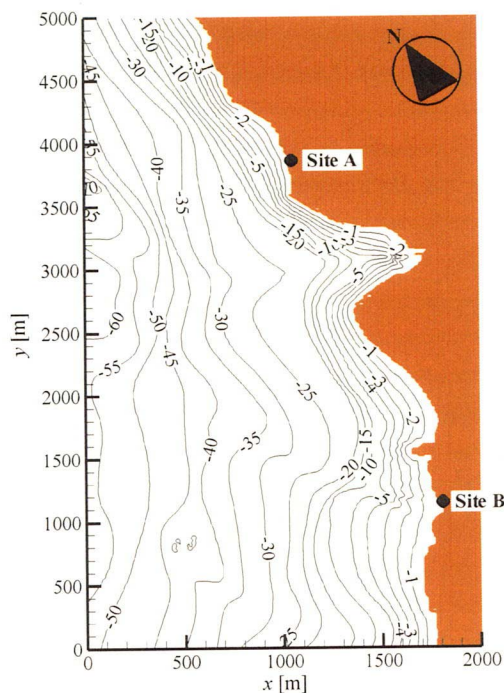


図-1 計算領域の水深分布

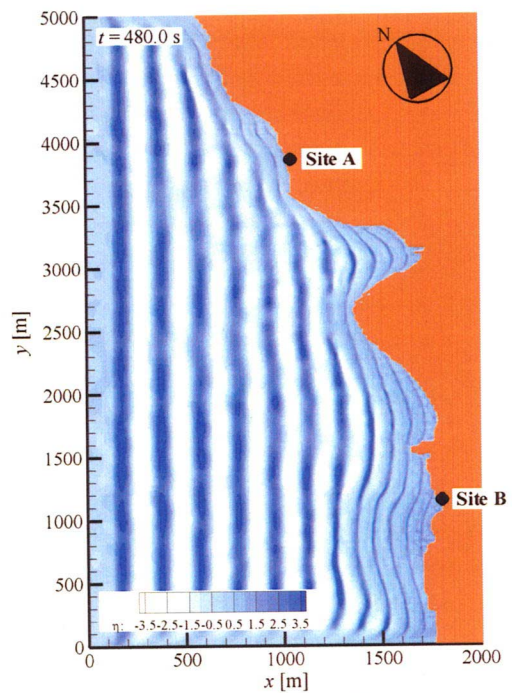


図-2 波浪伝播の様子

表-1 NOWT-PARIの計算条件

時間	時間間隔 Δt	0.015s
	終了時間	480.0s
格子	x, y 方向格子数	406, 1006
	格子間隔	$\Delta x = \Delta y = 5\text{m}$
波浪	波高 H	8.0m
	周期 T	12.0s
	沖側代表水深 h	52.24m
	潮位	0.79m
	波向	0°
碎波限界流速波速比 γ_b		0.6

流れ場を精度よく算定可能であり、実績の高い数値モデルである。さらに、平山・平石¹⁰⁾はNOWT-PARIに遡上モデルを加え、実現現象の再現計算を試みた。しかし、来襲波による護岸背後への越波状況の十分な再現には至っておらず、越波解析への適用には課題が残されている。また、後藤ら¹¹⁾は、NOWT-PARIと断面2次元粒子法モデルを接合し、低天端護岸への越波過程について定量的に検討を行った。ただし、複雑な実海底地形に対しては検討されていない。

以上の背景に基づき、本研究では、沖縄本島北部海域の現地海底地形を対象に、波の浅水変形・屈折・回折を同時に解析可能な平面2次元モデルの一つであるBoussinesqモデルNOWT-PARI Ver. 4.6c4と複雑な水面挙動を高精度に解析できる断面2次元数値波動水路CADMAS-SURFを採用し、それぞれの長所を活かしながら両計算結果を適切に接続することにより、両モデルを有効活用した越波対策護岸の実務耐波設計への可能性について検討することを目的としている。

2. NOWT-PARIによる平面2次元計算

(1) 計算条件および解析方法

本研究では、天然リーフが発達し、複雑な波動場となっている沖縄本島周辺海域の実海底地形を対象とした。図-1にNOWT-PARIにおける計算領域の水深分布を示す。当該海域には天然リーフが発達しているため、岸側に浅水域が分布し、沖側に向かって急激な水深変化を伴う地形となっている。また、CADMAS-SURFにて断面計算を行う対象地点を同図中に示す。Site A周辺は等深線が密となっており、水深が急変する地形である。一方、Site B周辺はSite Aよりも勾配が比較的緩やかな地形となっている。

表-1にNOWT-PARIにおける計算条件を示す。波浪条件として、波高 $H=8.0\text{m}$ 、周期 $T=12.0\text{s}$ の規則波を沖側に設定した入射境界($x=130\text{m}$)から波向 0° で入射させた。NOWT-PARIでは碎波判定を時空間的に行わなければならないため、逐次計算される水位 η や線流量フラックスを用いた碎波判定指標 γ_b が必要となる。そこで、本計算では規則波計算の推奨値に基づき、 $\gamma_b=0.6$ とした。また、計算領域の外周に、境界での反射波を抑えるためのエネルギー吸収帯を設定した。ただし、海域と陸域の境界は完全反射とした。本計算では、全格子点における水位 η を出力し、計算時間中における波高 H と平均水位 $\bar{\eta}$ をそれぞれ算出した。

(2) 沖合から護岸までの波浪変形特性

図-2は計算開始から $t=480.0\text{s}$ 後の波浪伝播の様子であり、淡色は波谷、濃色は波峰を示している。沖側では入射波が一定の波長を保ちながら岸に向かって進行しているものの、岸側では急激な水深変化や

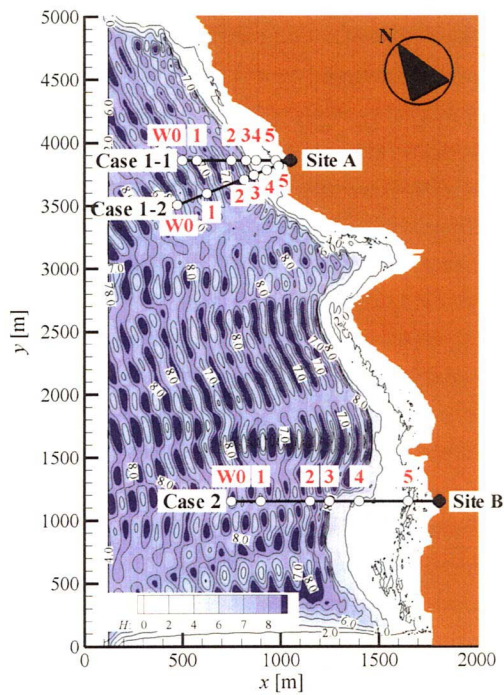


図-3 波高分布

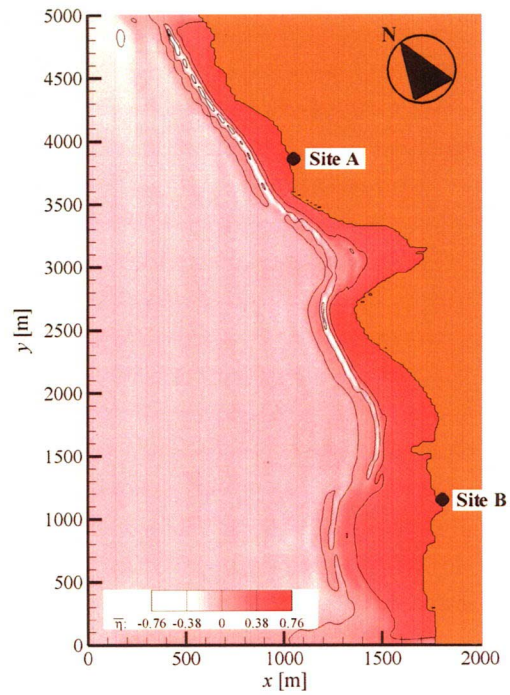


図-4 平均水位の空間分布

表-2 CADMAS-SURFでの計算条件

		Case 1-1	Case 1-2	Case 2
計算時間	時間間隔 Δt	0.001s		
	終了時間	500.0s		
計算領域	x方向格子数	596		1079
	z方向格子数	64		
	格子間隔	$\Delta x = \Delta z = 1 \sim 2m$		
波浪条件	地形長	550m	585m	1050m
	水深 h	35.38m	36.63m	35.26m
	潮位	0.79m	0.79m	0.79m
	波高 H	7.67m	7.56m	7.80m
	周期 T	12.0s	12.0s	12.0s

護岸からの反射波の影響によって進行波の波長が変化している。また、 $x=1500m$, $y=3000m$ 付近の入り江への波の伝播状況などから判断して、NOWT-PARIは沖合から岸側までの波の屈折や回折を含む波浪変形を適切に計算しているといえる。

図-3に計算領域における波高 H の空間分布を示す。同図から、沖側では入射波と岸からの反射波によって部分重複波動場が形成され、一方、岸側では砕波の影響により波高が急激に減衰していることが認められる。また、Site Bでは波向きがほぼ造波境界直角方向となっているものの、Site A周辺においては海底地形の影響に伴う波の屈折により入射波の波向きが大きく変化している。したがって、断面2次元モデルCADMAS-SURFとの接続の際には、岸に入射する波向きを考慮して断面を設定する必要がある。

図-4は水面変動量から算出した平均水位 $\bar{\eta}$ の空間分布を示しており、濃色は平均水位の上昇を意味する。図-3と図-4を比較すると、波高が急激に減衰している領域で、平均水位の上昇、つまりwave-set up

が顕著に認められる。ここで得られた波浪特性は、これまで川崎ら^{3), 12)}が検討を行ってきた断面2次元計算や水理模型実験での波浪伝播と同じ傾向を示しており、リーフ地形に対するNOWT-PARIの適用性を定性的に確認した。

3. CADMAS-SURFによる断面2次元計算

(1) 計算条件の設定

NOWT-PARIの計算結果をもとに、CADMAS-SURFを用いて護岸周辺の越波計算を行った。計算領域は、図-3に基づき、護岸への入射波向きによって決定した。なお、入射波向きの影響について検討するため、Site Aでは入射波向きを考慮しないCase 1-1（造波境界直角方向）と考慮したCase 1-2の2ケースについて越波計算を行った。また、Site Bでは顕著な波向き変化がみられなかったため、造波境界に対して直方向（Case 2）の1ケースのみとした。

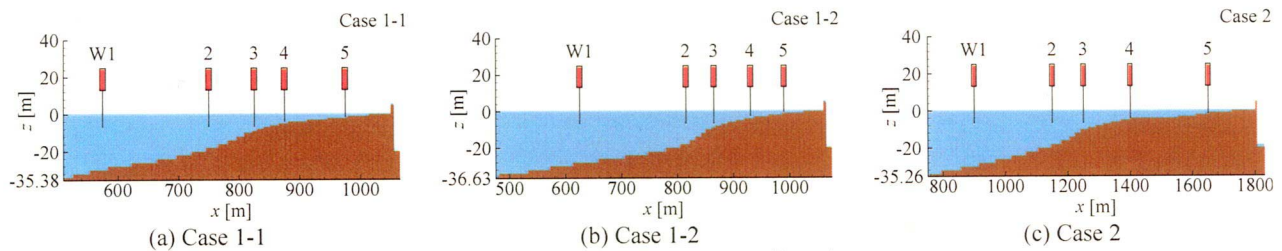


図-5 CADMAS-SURFによる計算領域

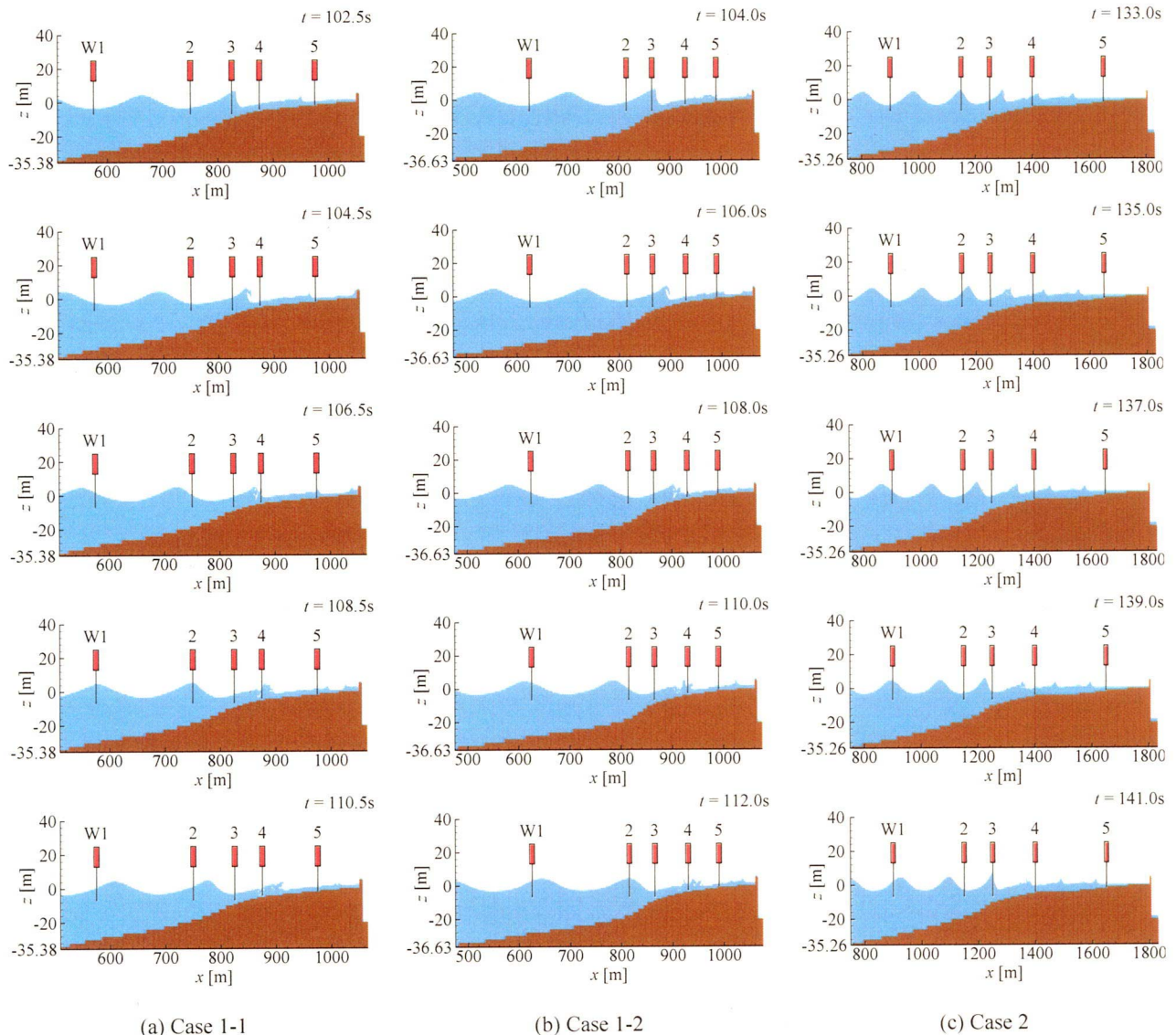


図-6 水面波形の空間変化

表-2に計算条件を示し、図-5に各ケースにおける計算領域を示す。計算断面の海底地形は、NOWT-PARIで用いた海底地形データから該当断面の水深を出力することによって作成した。また、計算開始地点は、全ケースに対し地形変化が安定する水深 $h \approx 35\text{m}$ の地点とした。なお、図-3において各断面に示したW0は、数値波動水路での計算開始地点を示している。

図-5(a)および(b)から、Site Aでは断面の取り方によって地形が異なっている。一方、Site BはSite Aよ

りもリーフが長く、これに伴って計算領域も大きくなっている。また、図-5中に示したW1～5は水面変動量の算出位置であり、各断面において水深が $h \approx 30, 20, 10, 5, 2\text{m}$ となる地点とした。

CADMAS-SURFでは、全断面において岸に天端高E.L.+5.00mの直立護岸を設定した。護岸背後に越波升を配置し、VOF関数 F 値の面積積分値から越波量 Q の時系列変化を算出した。また、護岸到達第1波目から計算終了までを越波量の計測時間とし、累積越波量を計測時間で除することによって越波流量 q を

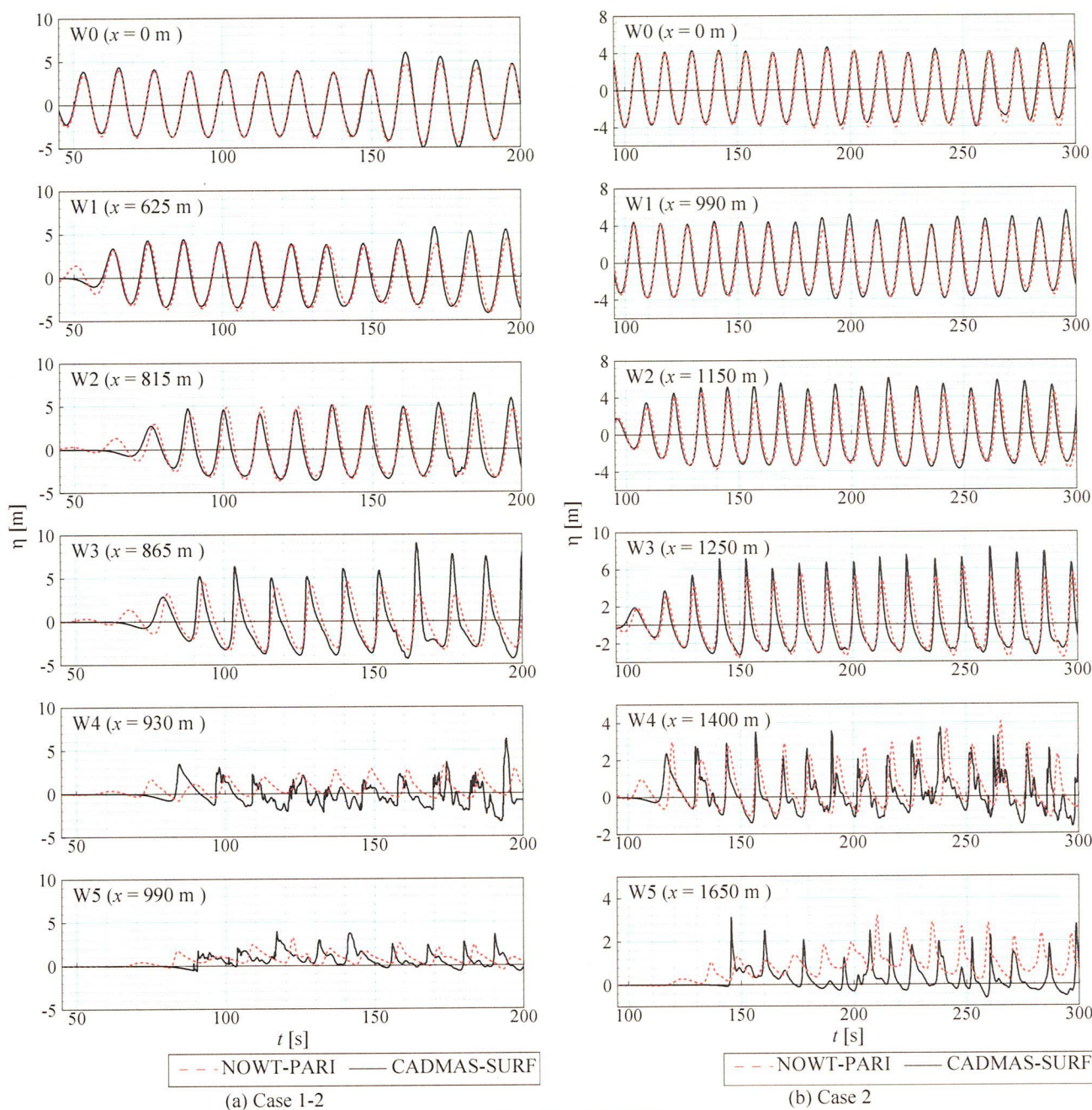


図-7 水面波形の時系列変化

算出した。

CADMAS-SURFでは、NOWT-PARIで得られた水面変動量 η の時系列から時々刻々の水平・鉛直方向の流速を算出し、マトリクスデータとして水位と流速を造波境界に与えることによって造波した。なお、NOWT-PARIによる水面変動量からゼロダウンスロス法によって算定した波高および周期は表-2に示すとおりであり、Case 1-1とCase 1-2において入射波特性に大きな差はない。

(2) 直立護岸の越波解析

水面波形の空間変化を図-6に例示する。全断面において、水深が10mから5mへ変化するW3とW4の間にて巻き波砕波が生じ、その後は繰り返し砕波を伴

いながら岸側へ進行している様子が確認できる。特に、リーフ長が大きいSite B (Case 2) では繰り返し砕波によって、岸側での波高減衰が著しい。なお、護岸背後への越波は、Case 1-2のみでの発生を確認した。

図-7に、NOWT-PARIおよびCADMAS-SURFによって計算された水位 η の時系列変化の比較を示す。なお、Case 1-1とCase 1-2では水面変動量に大きな違いがみられなかったため、紙面の都合上、ここではCase 1-2およびCase 2の計算結果を図示する。各図から、計算開始地点W0において、CADMAS-SURFはNOWT-PARIの水面変動量を再現していることが確認できる。また、両ケースとも計算初期において、非砕波領域であるW2 ($h \approx 20\text{m}$) までは振幅および

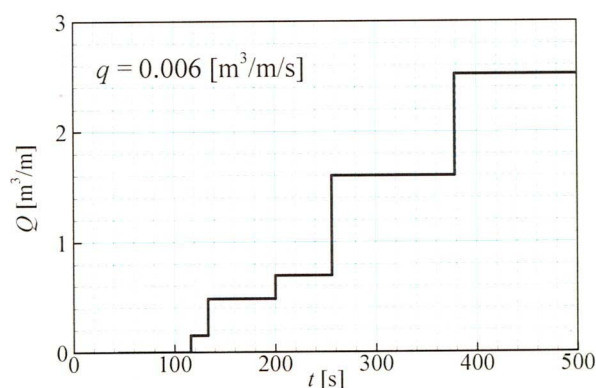


図-8 越波量の時系列変化 (Case 1-2)

位相がほぼ一致しており、沖側での規則的な水面変動が確認できる。しかし、砕波後のW4 ($h \approx 5\text{m}$) およびW5 ($h \approx 2\text{m}$) では両者の水面変動量に差異がみられる。特に、CADMAS-SURFでは波の非線形性の卓越がNOWT-PARIよりも著しい。経験値に基づく砕波指標を用いるNOWT-PARIに対し、CADMAS-SURFではVOF関数 F の移流方程式によって自由表面の運動学的境界条件を満足しているため、NOWT-PARIに比べ、CADMAS-SURFの方が砕波を合理的に表現していると考えられる。したがって、NOWT-PARIからCADMAS-SURFに接合して護岸周辺の越波解析をする際には、砕波帯を含む領域を計算することが推奨される。また、越波の発生を確認したCase 1-2では、計算経過とともに、NOWT-PARIとCADMAS-SURFにおける水面変動量の振幅量および位相に若干の差異が認められる。CADMAS-SURFでは断面2次元場における越波計算が可能であるため、波浪変形だけでなく、護岸背後への越流によっても両者の計算結果に差異が生じる。したがって、沖合の波浪変形計算にはNOWT-PARIを、護岸周辺の越波計算にCADMAS-SURFを用いることにより、両モデルの特性を活かした越波解析が可能になると考えられる。

図-8は、Case 1-2における越波量の時系列変化である。計算時間の経過に伴い、越波流量が増えており、1波あたりの越波流量が増加している。なお、本研究における計算条件では、Case 1-2のみで越波が発生した。したがって、Site Aにおける越波形態は、Case 1-1とCase 1-2で大きく異なっている。このことは、越波量に及ぼす護岸への入射波向きの影響が大きいことを示唆するものである。したがって、平面計算による波浪変形を反映させる方法のひとつとして、沖合から護岸への波向き線に基づいた断面計算により、より正確な越波計算が行えると考えられる。

4. おわりに

本研究では、断面2次元数値波動水路CADMAS-

SURFと平面2次元BoussinesqモデルNOWT-PARIを用い、3次元数値モデルの代替として、沖合の波浪変化を考慮した護岸周辺の越波解析を試みた。その結果、平面および断面2次元モデルを有効活用することは、波の浅水変形・屈折・回折の影響のみならず、砕波・越波現象も良好に考慮することができる上、計算負荷が少ないため、越波対策護岸の耐波設計をする際に役立つことを示した。

なお、本稿では、NOWT-PARIにおける波高の空間分布から、対象護岸への入射波の波向きを推定し、CADMAS-SURFにおける計算断面を決定した。しかしながら、適切な計算断面を評価する方法については更なる検討が必要であり、今後残された検討課題である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 磯部雅彦，高橋重雄，余 錫平，神山 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.
- 3) 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：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. 951-955，2007.
- 4) 長瀬恭一，島田昌也：MARS法を用いた数値波動水槽に関する研究，海岸工学論文集，第47巻，pp. 46-50，2000.
- 5) 後藤仁志，五十里洋行，酒井哲郎：粒子法による三次元数値波動水槽の開発，海岸工学論文集，第52巻，pp. 26-30，2005.
- 6) 有川太郎，山田文則，秋山 実：3次元数値波動水槽における津波波力に対する適用性の検討，海岸工学論文集，第52巻，pp. 46-50，2005.
- 7) 川崎浩司，袴田充哉：3次元固気液多相乱流数値モデルDOLPHIN-3Dの開発と波作用下での漂流物の動的解析，第54巻，海岸工学論文集，pp. 31-35，2007.
- 8) Nakamura, T.: Sand Foundation Instability due to Wave-Seabed-Structure Dynamic Interaction, Ph.D. Thesis, Nagoya University, 103 p, 2008.
- 9) 平山克也：非線形不規則波浪を用いた数値計算の港湾設計への活用に関する研究，港湾空港技術研究所資料，No.1036，162 p，2002.
- 10) 平山克也，平石哲也：平面2次元ブシネスクモデルによる砕波・遡上計算法の開発と現地適用，海岸工学論文集，第52巻，pp. 11-15，2005.
- 11) 後藤仁志，五十里洋行，目見田哲，安岡恒人，望月貴文：低天端護岸上部の大型排水路への越波過程に対する粒子法の適用性，海岸工学論文集，第53巻，pp. 701-705，2006.
- 12) 川崎浩司，菊 雅美，笹田泰雄：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，海洋開発論文集，第33巻 (印刷中).