不規則波越波計算による道路護岸周辺の 越波対策工法の選定に関する研究

川崎 浩司¹・菊 雅美²

¹正会員 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 C1-3 (651))

E-mail: kawasaki@nagoya-u.jp

²正会員 元名古屋大学技術補佐員 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 C1-3 (651))

E-mail: kiku@nagoya-u.jp

本研究では、断面2次元造波水路を用いた水理模型実験の再現計算を数値波動水路 CADMAS-SURF に
よって行い、不規則波作用下での越波現象に対する数値波動水路の妥当性について検討した。そして、越
波被害を受けている道路護岸の越波対策工法を評価・選定する手段として、現地海底地形に数値波動水路
CADMAS-SURF を適用し、3種類の護岸形状に対して護岸天端高を変化させながら、不規則波越波計算を
行った。その結果、従来の手法では算定できなかった特殊形状護岸に対する越波流量を数値波動水路に
よって適切に算定できることを明示した。さらに、各護岸形状に対して総合評価を行うことにより、検討
対象地域の特性に適した越波対策工法の選定が可能になることを明らかにした。

Key Words: countermeasure against wave overtopping disaster, numerical computation, irregular wave,
CADMAS-SURF, flaring shaped seawall

1. はじめに

(1) 研究の背景

沿岸域で発生する越波災害は、低気圧の接近・通過時において人的・物的被害をもたらす。特に、主要幹線道路が発達している我が国では、路上越波による運転者の視界不良や通行規制に伴う地域間の交通遮断が、物流や人々の生活に大きな支障をきたしている。我が国では、1959年の伊勢湾台風を契機に、海岸防災施設の整備が進められてきたものの、2008年富山県高波災害にみられるように、越波災害を被る地域は今日においても後を絶たない。さらに、気象庁¹⁾による海面水温の長期変化傾向調査から、日本周辺海域における著しい水温上昇が判明しており、今後、地球温暖化による海水面の上昇や台風勢力の強大化が懸念されている。そのため、人命および財産保護の観点から、高波・高潮による越波対策を講じることは極めて重要であり、急務である。

一方、1999年に抜本的に改正された海岸法により、海岸災害からの防護だけでなく、海域環境や海岸施設利用を考慮した海岸整備が求められている。その

ため、越波対策工法の選定には、単なる護岸天端高の嵩上げだけでなく、対象地域の特性を把握し、経済性・景観性・維持管理性などを含めた総合的な判断が必要となっている。そこで、従来の直立護岸や消波ブロック被覆式護岸に代わり、様々な機能を有する特殊形状護岸が開発されている。例えば、村上ら²⁾によるフレア式護岸は、来襲波を沖側に打ち返すことによって越波を低減するだけでなく、護岸天端上の有効活用も可能となっている。また、島谷ら³⁾は、消波機能のみならず、海域環境の改善が見込まれる藻場造成機能を付加したスリットケーソンを提案している。しかし、実務において広く適用されている合田ら⁴⁾の越波流量算定図は、一様勾配地形における直立護岸および消波ブロック被覆式護岸を対象としており、前述のような複雑な形状の海岸構造物に対する越波流量の算定は困難である。そこで、特殊形状護岸を設計する際には、水理模型実験の実施が必須となるものの、越波現象は波浪条件や海底地形、護岸の形状・設置水深など数多くの要素に影響されることから、越波対策を図るには、当該地域における種々の検討が必要である。しかし、多

図-2 越波対策工法選定対象地における海底地形および現況護岸の断面図

図-1 越波対策検討箇所の現況

大な労力や費用を要する水理模型実験では、様々な条件下における検討は難しい。

近年、計算機の飛躍的な性能向上と高精度な計算スキームの開発により、碎波や越波など複雑な波浪場を精度良く解析可能な数値モデルが数多く提案されている。これに伴い、経験式や水理模型実験を補う手段として数値モデルの導入が積極的に進められており、例えば、欧州の CLASH (Crest Level Assessment of Coastal Structures by Full Scale Monitoring, Neural Network and Hazard Analysis on Permissible Wave Overtopping) プロジェクトでは、Ingram et al.⁵⁾の数値モデル AMAZON-SC を活用している。我が国においても、実用的かつ複雑な自由表面の取り扱いが可能な数値モデル、断面 2 次元数値波動水路 CADMAS-SURF (Super Roller Flume for Computer Aided Design of Maritime Structure)^{6), 7)}が実務において適用されつつある。数値波動水路 CADMAS-SURF の精度検証は、磯部ら⁸⁾をはじめとして、これまでに水理模型実験との比較が数多く実施されている。越波現象に対しても、規則波作用下については川崎ら⁹⁾、不規則波作用下については藤原ら¹⁰⁾などにより、精度良く越波流量を算定できることが示されている。したがって、今後、CADMAS-SURF を実海域へ適用した護岸設計が広く行われていくと考えられる。川崎ら¹¹⁾は、現地海底地形に CADMAS-SURF を適用して護岸の形状および天端高を変化させた越波解析を行い、現地の特性を考慮した越波対策工法を提案している。しかし、作用波として規則波を用いており、不規則波作用下における検討は行っていない。そのため、実海底地形を対象とし、特殊形状護岸を含む越波対策工法の検討に対する不規則波越波計算の有効性は示さ

れていないのが現状である。

(2) 越波対策工法選定地域の現状

本研究では、低気圧の接近・通過時において図-1に示すような路上越波を観測し、年数回程度の通行規制が実施されている道路護岸を越波対策工法の検討箇所とした。図-2は、現地詳細測量を基に作成した越波対策工法選定対象地における海底地形および現況護岸の断面図である。対象とする海底地形の断面は、約1/33の比較的緩やかな勾配となっており、岸には景観を考慮するために、低天端かつ、天端幅の狭い護岸が設置されている。また、越波の軽減を目的に、護岸前面には多数の消波ブロックが配置されている。護岸背後には、幹線道路としてだけでなく、地域住民の生活道路の役割も担う片側一車線の道路が敷設されており、民家が隣接している。対策検討箇所を含む通行規制区間では、通行規制実施時の孤立人口が数千人に達すると試算されており、さらに、大幅な迂回によって平常時に比べて3倍の移動時間を要する可能性が指摘されている¹²⁾。そのため、路上越波による道路の通行規制は、住民や道路利用者に多大な影響を与えており、防災面、交通利用面の観点から、越波対策の早期着工が必要とされている。

(3) 研究の目的

上述の背景を鑑み、本研究では、特殊形状護岸を含む越波対策工法の検討に対する不規則波越波計算の有用性を明らかにすることを目的とする。具体的には、対象地域の越波対策工法として直立護岸、消波ブロック被覆式護岸、半円弧状護岸の3断面を取り上げ、不規則波作用下における水理模型実験の再現計算を数値波動水路 CADMAS-SURF によって行い、各護岸に対する越波計算の妥当性を検証する。そして、越波対策工法の選定として、現地海底地形に CADMAS-SURF を適用し、護岸の断面形状や天端高を変化させた越波数値解析から、許容越波流量を満足する護岸天端高を算定するとともに、水理学的な観点から最適な越波対策工法を選定する。

表-1 護岸天端高 h_c

	S	M	L
Type 1	0.088 m	—	0.115 m
Type 2	0.088 m	—	0.115 m
Type 3	0.093 m	0.116 m	0.141 m

表-2 波浪条件

有義波高 $H_{1/3}$	0.050 m～0.150 m
有義波周期 $T_{1/3}$	2.44 s
造波板前面水深 h	0.435 m

Bretschneider・光易型とし、造波開始 10s 後から 163.84s 間のデータを波浪の解析対象とした。

水面変動量の測定には容量式波高計を用い、図-3 に示す 9 点においてサンプリング周波数 100Hz で水位 η の時系列変化を記録した。越波量の測定は、模型床背後の遮水領域内部に設置した越波升を用いて行った。護岸天端上と越波升を幅 0.3m の導水板によって接続し、護岸に第 3 波が到達した後に護岸を越えた水塊を越波升に流入させた。そして、越波升内の総重量を計測時間 (163.84s) と導水板の幅で除することにより、越波流量を算出した。なお、越波量の測定は同一波浪で 3 回行い、平均値を越波流量 q_{exp} とした。

(2) 数値波動水路 CADMAS-SURF による再現計算

表-3 に、本計算で使用した各パラメータを示す。数値計算における造波信号は、水理模型実験で使った不規則波造波信号のフーリエ変換から各周波数 f_m の振幅 a_m および位相角 ε_m を求め、式 (8)～式 (10) から造波境界における水位 η と水平・鉛直方向の水粒子速度 u , w を算出して作成した。そして、図-3 中の W1 を波高検定地点とし、水理模型実験における有義波高 $H_{1/3}$ と一致するように通過波検定を行った。

$$\eta(t) = \sum_{m=1}^M a_m \cos(2\pi f_m t + \varepsilon_m) \quad (8)$$

$$u(z, t) = \sum_{m=1}^M 2\pi f_m \frac{\cosh k_m(h+z)}{\sinh k_m h} a_m \cos(2\pi f_m t + \varepsilon_m) \quad (9)$$

$$w(z, t) = \sum_{m=1}^M 2\pi f_m \frac{\sinh k_m(h+z)}{\sinh k_m h} a_m \sin(2\pi f_m t + \varepsilon_m) \quad (10)$$

ここに、 z は静水面から上方を正とする鉛直座標、 M は成分波 m の総数で、本検討では 16384 とした。また、 k_m は波数 ($=2\pi/L_m$ で L_m は波長) である。

計算領域は水理模型実験と同一条件とし、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

表-3 計算条件

計算時間	計算間隔 Δt	0.0002 s
	終了時刻 t_{END}	200 s
格子間隔	x 方向 $\Delta x/L$	1/96～1/960
	z 方向 $\Delta z/L$	1/240～1/960
差分	DONOR パラメータ	0.5
TimerDoor 法	気泡上昇量	0.2 m/s
	水滴落下速度	Free
境界条件	速度・圧力	Slip
	VOF 関数 F	Free
消波工	間隙率	0.5
	慣性力係数 C_M	1.2
	抗力係数 C_D	1.0

不等間隔格子を採用することにより、碎波および越波現象を高精度かつ効率的に解析するようにした。また、基礎方程式の移流項の差分には、1 次風上差分と 2 次中央差分の割合が 1:1 となる VP-DONOR-0.5 を採用した。護岸前面に消波ブロックを有する Type 2 に関しては中野ら¹³⁾を参考に、消波工内部の空隙率を 0.5、慣性力係数 C_M を 1.2、抗力係数 C_D を 1.0 として計算を行った。なお、CADMAS-SURF に導入されている高 Re 型 $k-\varepsilon$ 2 方程式モデルを適用したところ、本検討においては計算が不安定になることが確認されたため、乱流モデルは使用しなかった。

数値計算では、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および背後を越波升領域とした。そして、越波升内における VOF 関数 F 値の面積積分から越波量の時系列変化を求めるとともに、総越波量を解析時間で除することで越波流量 q_{cal} を算出した。なお、数値計算においても、水理模型実験と同様に、護岸に第 3 波が到達してから 163.84s 間を越波量の解析時間とした。また、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を与えた。

(3) 波浪伝播および越波現象に対する数値波動水路 CADMAS-SURF の妥当性

a) 水位変動・波高・平均水位

図-4 に、直立護岸 (Type 1) を設置したときの水位比 η/H_0' の時系列変化を例示する。同図から、波高検定地点である W1 ($x=4.00\text{m}$) において、計算は実験波形を十分に再現していることが確認された。計算結果の可視化から、図-4 に示した条件下では、一樣斜面上の $x=11.00\text{m}$ より岸側にて碎波の発生が確認された。そのため、W3～W10 では碎波の影響によ

 図-4 Type 1 ($H_0' = 0.142$ m, $h_c = 0.088$ m) での水位変動

 (a) Type 2 ($H_0' = 0.096$ m, $h_c = 0.115$ m)

 (b) Type 3 ($H_0' = 0.135$ m, $h_c = 0.141$ m)

図-5 有義波高比および平均水位比の空間分布

(a) 水理模型実験

(b) 数値計算

図-6 Type 3 設置時における護岸周辺の越波状況

り、波峰のピーク値に若干の差異が生じている。ただし、数値計算は、岸側に近づくにつれて減少する水位変動の変化を捉えており、碎波後の複雑な水面変動も計算できているといえる。図-5は、消波ブロック被覆式護岸(Type2)および半円弧状護岸(Type3)を設置したときの有義波高比 $H_{1/3}/H_0'$ と平均水位比 $\bar{\eta}/H_0'$ の空間分布の一例である。同図(b)に示すように、入射波高が大きい条件下では、波峰のピーク値に生じる若干の差異によって数値計算は水理模型実験値の $H_{1/3}/H_0'$ を過小評価する傾向が認められた。ただし、同図から、数値計算においても同様斜面上での $H_{1/3}/H_0'$ と $\bar{\eta}/H_0'$ の変動傾向は概ね一致していると判断される。紙面の都合上、ここでは図示しないが、他の全29ケースにおいて、護岸形状に関わらず、同程度の再現性を確認した。

b) 護岸周辺の越波状況・越波流量

半円弧状護岸(Type3)を設置したときの護岸周辺の越波状況を図-6に例示する。同図から、半円弧状護岸への波の進入や護岸上の越波状況、波の反射について、水理模型実験と数値計算はほぼ同様であり、特殊形状護岸に対するCADMAS-SURFの再現性が定性的に確認された。

無次元越波流量について、数値計算 $q_{\text{cal.}}/\sqrt{2gH_0'^3}$ と水理模型実験 $q_{\text{exp.}}/\sqrt{2gH_0'^3}$ の比較を図-7に示す。同図から、Type1では水理模型実験と数値計算の結果がほぼ1:1の関係であり、CADMAS-SURFは精度良く越波流量を算定できている。一方、Type2およびType3では、計算値が水理模型実験値を最大で3倍

図-7 越波流量に対する水理模型実験と数値計算の比較

程度過大評価している。この要因のひとつとして、護岸設定の再現性が挙げられる。特に、Type2では、中野ら¹³⁾を参考に消波工内のパラメータ値を設定したため、水理模型実験における消波工を再現できていなかったことが考えられる。そのため、越波量の算定精度を向上させるためには、消波工内のパラメータを変化させた検討を行う必要がある。ただし、合田の越波流量算定図から推定される消波護岸の無次元越波流量 $q/\sqrt{2gH_0^3}$ のばらつきは、 10^{-3} オーダーのときに0.2～3倍になると見積もられている¹³⁾。一方、数値計算は実験値の無次元越波流量を3倍以内に推定していることから、消波工内部のパラメータとして既往の提案値を使用した場合でも、不規則波作用下における越波流量をCADMAS-SURFによって算定できるといえる。また、Type3については、矩形格子による半円弧状護岸の再現性が低いことが挙げられる。そのため、計算格子を細かくすることで越波量の算定精度が向上するものと考えられる。本検討においては、水理模型実験と数値計算の無次元越波流量は同程度のオーダーに収まっていることから、CADMAS-SURFはType3における越波量についても再現できていると判断した。

4. 現地海域を対象とした道路護岸の越波計算と越波対策工法の提案

第3章では、水理模型実験との比較により、不規則波越波計算に対する数値波動水路CADMAS-SURFの妥当性を示した。本章では、現地

表-4 現地海底地形に対する計算条件

計算時間	計算間隔 Δt	0.001 s
	終了時刻 t_{END}	1400 s
格子間隔	x方向 $\Delta x/L$	1/103～1/1033
	z方向 $\Delta z/L$	1/103～1/1033

海底地形へCADMAS-SURFを適用し、台風時の再現計算からその適用性を定性的に検討するとともに、護岸天端高を変化させた越波計算および各護岸に対する評価により、対象とする現地に対して最適な護岸の形状および天端高を選定する。

(1) 台風通過時における道路護岸周辺の再現計算

現地海底地形へのCADMAS-SURFの適用性を検証するため、路上越波の発生により通行規制が実施された台風0423号通過時の再現計算を行い、ビデオ画像と計算結果を定性的に比較・検証した。現地では波浪観測が行われていなかったため、台風モデルによって当該海域の海上風を推定するとともに、海上風の風速と吹送時間、吹送距離から、対象海域一帯の沖波波浪諸元を算定した。これを基に、エネルギー平衡方程式を用いて波浪変形計算を行い、本計算において対象とする海域の換算沖波波高 H_0' を求めた。その結果、CADMAS-SURFの計算開始地点における換算沖波波高は $H_0'=3.8\text{m}$ となった。そこで、潮位EL+0.79mの条件の下、修正Bretschneider・光易型のスペクトルを用いて、有義波高 $H_{1/3}=3.8\text{m}$ 、有義波周期 $T_{1/3}=12.0\text{s}$ の不規則波を作成した。現地海底地形にCADMAS-SURFを適用した際の計算領域および計算条件は図-2と表-4にそれぞれ示すとおりであり、その他の条件は表-3と同様である。

図-8に、台風0423号通過時に監視カメラによって撮影されたビデオ画像と計算結果の比較を示す。図-8(a)に示すビデオ画像から、消波ブロックに沿って水位上昇が生じ、越波水塊が山側の道路車線まで達している様子が確認できる。一方、図-8(b)に示す計算結果においても、波浪来襲時に水塊が消波ブロックに沿って打ち上がり、護岸天端上を流れる様子がみられる。また、CADMAS-SURFによって得られた越波量 Q の時系列を示す図-9から、越波流量は $8.2 \times 10^{-2} \text{m}^3/\text{m/s}$ と算出され、土木工事設計要領¹⁵⁾で定められている許容越波流量 $1.0 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{m/s}$ を大きく上回った。台風通過時には、当該地域で通行規制が行われており、車両通行に危険性があると判断されるほどの越波が発生している。したがって、定性的ではあるものの、CADMAS-SURFは実際の越

(a) ビデオ画像

(b) 数値計算結果

図-8 台風 0423 号通過時の越波状況

図-9 越波量の時系列変化

(a) 直立護岸+離岸堤

(b) 消波ブロック被覆式護岸

(c) 半円弧状護岸

図-11 越波対策工法の検討断面

波状況を良好に再現していると判断できる。

(2) 越波対策工法の評価と選定

a) 越波対策工法の選定方法

図-10 に、本研究で行った越波対策工法の選定方

図-10 越波対策工法の選定方法

法を示す。設計波高は対象地域における 50 年確率波とし、前節と同様、エネルギー平衡方程式を用いて CADMAS-SURF の計算開始地点における換算沖波波高 H_0' を算出した。この結果に基づき、有義波高 $H_{1/3} = 4.9\text{m}$ 、有義波周期 $T_{1/3} = 15.39\text{s}$ の不規則波信号を作成し、109 波を入射させた。設計潮位は既往最高潮位 H. H. W. L. (EL+1.4m) とした。なお、ゼロダウクロス法によって算出した造波境界における有義波高および有義波周期はそれぞれ $H_{1/3} = 4.9\text{m}$ 、 $T_{1/3} = 16.10\text{s}$ である。

本検討では、図-2 に示した現地海底地形における越波対策工法として、図-11 に示すように、直立護岸、消波ブロック被覆式護岸、半円弧状護岸の 3 断面を取り上げた。ただし、護岸天端高を低く抑えることを目的に、直立護岸の前面に離岸堤を設置した。消波ブロックによって形成された離岸堤を有する直立

護岸では、波浪が離岸堤により低減されるため、直立護岸のみの場合と比べて、護岸天端高を低減することが可能である。離岸堤の効果は設置位置や天端幅などによって異なるため、本研究では、試行計算の結果を基に、直立護岸と離岸堤の離隔距離を 50m とした。消波ブロック被覆式護岸は現地における現況護岸と同形式である。一方、半円弧状護岸は、護岸前面が沖側に張り出す特殊形状護岸であり、従来の直立護岸や消波ブロック被覆式護岸と比較して、越波の大幅な低減や護岸天端上の有効利用が期待されている。なお、本検討では、対象地域の環境性を考慮して埋め立て面積を極力抑えられるよう護岸断面を設計したため、半円弧状護岸は他の護岸とマウンド形状が異なる。新規護岸は、道路幅の拡張と歩道空間の確保を目的に、現況護岸より沖側の位置で設計を行った。

各護岸形状において許容越波流量以下となる最低天端高を CADMAS-SURF を用いて算出した。数値計算では、計算開始後に第 1 波が護岸直前に到達してから、計算終了となる 1400s 間を解析対象時間とし、累積越波量を計測時間で除することによって越波流量を求めた。また、数値計算だけでなく、越波流量算定図によって算出される護岸天端高も勘案

し、最終的な設計天端高を決定した。なお、直立護岸および消波ブロック被覆式護岸は合田ら⁴⁾、半円弧状護岸は片岡ら¹⁶⁾の越波流量算定図を用いた。以下に、その詳細を示す。

b) 設計天端高の算出

許容越波流量以下となる設計天端高を決定するため、3 形状の護岸に対して護岸天端高を変化させた数値計算を行った。図-12 に各断面での護岸周辺における水面波形の空間変化を例示する。なお、図-12 (a) および図-12 (b) は護岸天端高が EL+6.00m、図-11 (c) は EL+6.35m のときの計算結果である。各図において、計算開始後第 1 波目が護岸付近に到達する $t=66.0$ s の空間変化と比較すると、図-12 (a) に示す離岸堤を有する直立護岸では、他の形状よりも護岸到達までに時間を要しており、離岸堤による進行波の減衰効果が認められる。また、消波被覆式ブロック護岸では、図-12 (b) において消波ブロック内での進行波の消散効果がみられる。さらに、図-12 (c) の半円弧状護岸では、沖に張出した特殊断面形状によって、 $t=736.0$ s の時には波が沖合へと打ち返されていることがわかる。したがって、CADMAS-SURF によって各護岸形状の特徴を反映した波浪計算が行われているといえる。各護岸にお

図-13 越波計算に基づく護岸天端高の設定

表-5 許容越波流量以下となる最低天端高の比較および設計天端高の決定

		直立護岸 +離岸堤	消波ブロック被覆式護岸	半円弧状護岸	現況護岸 天端高
数値計算	不規則波	EL+7.6 m	EL+8.2 m	EL+6.4 m	EL+5.04 m
	規則波 ¹⁾	EL+6.6 m	EL+7.5 m	EL+6.6 m	
越波流量算定図		EL+11.9 m ^{*1}	EL+9.1 m	EL+7.4 m ^{*2}	
設計天端高		EL+8.0 m	EL+8.5 m	EL+7.0 m	

*1 直立護岸前面の離岸堤は考慮していない

*2 海底勾配1:10の算定図から算定

いて最大越波量を記録した時の越波状況を示した各図から、流速の大きい水塊が護岸背後へと越流する様子が確認できる。また、半円弧状護岸では、円弧内の水位が低下しないうちに次の波が来襲することによる越波の発生がみられた。さらに、流速分布から、半円弧状護岸では、入射波が減衰することなく沖側へと反射されるため、護岸底部において冲向きの流速が大きくなることがわかった。

図-13は、CADMAS-SURFによって算出された各断面における護岸天端高と越波流量の関係を示している。各護岸形状とも、護岸天端高を変化させた3ケースの計算を行った。そして、計算結果に基づいて得られた近似曲線を用いて、越波流量が許容越波流量 $1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m/s}$ 以下となる最低護岸天端高を求めた。その結果、表-5に示すように、離岸堤を有する直立護岸ではEL+7.6m、消波ブロック被覆式護岸ではEL+8.2m、半円弧状護岸ではEL+6.4mとなり、半円弧状護岸は最も護岸天端高を抑えられることが明らかとなった。

規則波を用いた川崎ら¹¹⁾の数値計算結果と比較すると、半円弧状護岸の場合はほぼ同程度となったものの、離岸堤を有する直立護岸および消波ブロック被覆式護岸においては、最低護岸天端高に1m程度の差異が生じた。川崎ら¹¹⁾は、発生頻度を考慮した規則波の越波量評価により、不規則波を作用させた場合と同様の越波流量が評価できる規則波の波高を算定した。しかし、本計算結果のように、規則波と

不規則波作用下における計算結果に差異が生じる場合もあることから、越波対策を検討する際には、数値計算においても不規則波作用下における越波量の算定が望ましいといえる。

越波流量算定図から許容越波量を満足する必要天端高を求めたところ、表-5に示すように、離岸堤を有する直立護岸では計算値を大きく上回った。この理由として、越波流量算定図では沖合に設置された離岸堤を考慮していないことが挙げられ、離岸堤による消波効果が反映されていないためであるといえる。また、半円弧状護岸については、検討対象断面の海底勾配(1:33)に対し、片岡ら¹⁶⁾による海底勾配1:10を対象とした越波流量算定図を用いて算定を行った。そのため、同条件下における越波流量として容易に比較・判断することはできない。このことから、特殊形状を有する構造物や複雑な海底地形を対象とする場合、CADMAS-SURFの有用性が発揮されることが明らかとなった。

海岸保全施設技術研究会¹⁷⁾によると、堤防天端高の設計では、若干の不確実性を考慮して最大1.0m程度を限度とする余裕高の設定が推奨されている。そこで、越波の現況や護岸背後の状況、越波流量算定図によって得られた結果などを勘案し、各護岸の設計天端高を算出した。その結果、各護岸における天端高は、離岸堤を有する直立護岸ではEL+8.0m、消波ブロック被覆式護岸ではEL+8.5m、半円弧状護岸ではEL+7.0mとなった。

c) 水理学的観点からの評価

前述のように、対象地において最も護岸天端高を低く抑えられるのは、半円弧状護岸であることが明らかとなった。村上ら¹⁸⁾は、地球温暖化に伴う海面上昇によってフレア型護岸の越波阻止性能は低下するものの、想定されている海面上昇量程度であれば、護岸天端高を前出しする対策工が有効であることを示している。したがって、水理学的な観点から評価すると、本研究で対象とした箇所では、半円弧状護岸が最も適合した越波対策工法であるといえる。さらに、水理学的な観点に加えて、経済性、環境性、施工性などを含めた多面的な視点から対策工法を評価することにより、対象地域に合った対策工法の提案が可能となる。

5. おわりに

本研究では、断面2次元造波水路による水理模型実験の再現計算を数値波動水路 CADMAS-SURF で行い、不規則波を作用させたときの越波計算に対する CADMAS-SURF の妥当性を検証した。そして、CADMAS-SURF を、過去に越波被害を受けた道路護岸に適用し、護岸の断面形状や天端高を変化させながら越波計算を行った。その結果、従来、越波流量算定図では求められなかった特殊形状護岸の越波流量について、CADMAS-SURF は適切な算定が可能であることを示した。また、本研究で得られた水理学的な観点に加えて、経済性、環境性、施工性、維持管理性などを含めた総合的な評価により、対象地域の特性に適合した対策工法を提案することが可能となることを示した。

謝辞：本研究の一部は、科学研究費補助金若手研究(A)(研究代表者：名古屋大学・川崎浩司、課題番号：21686046)および特別研究員奨励費(研究代表者：名古屋大学・菊 雅美、課題番号：2110250)であることをここに付記し、感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 気象庁：海面水温の長期変化傾向(全球平均)(オンライン), http://www.data.kishou.go.jp/shindan/a_1/glb_warm/glb_warm.html, 参照 2010-11-10, 2010.
- 2) 村上啓介, 上久保祐志, 入江 功, 香月 理, 片岡保人, 中岡威博：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, 1998.
- 3) 島谷 学, 小棚木鉄平, 岩本裕之：藻場造成機能を有

- するスリットケーソンの水理特性に関する研究, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 841-845, 2003.
- 4) 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.
- 5) Ingrama, D. M., Gaob, F., Causonb, D. M., Minghamb, C. G. and Trochc, P.: Numerical investigations of wave overtopping at coastal structures, Coastal Engineering, Vol. 56, No. 2, pp. 190-202, 2009.
- 6) 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.
- 7) 財団法人沿岸開発技術研究センター：CADMAS-SURF 実務計算事例集, 沿岸技術ライブラリー No. 30, 306 p, 2008.
- 8) 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.
- 9) 川崎浩司, 菊 雅美, 笹田泰雄, 眞栄里和也, 内間安治, 嶋田 宏, 五味久昭, 三浦健悟, 柴多哲郎：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, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp. 831-835, 2008.
- 10) 藤原隆一, 川崎浩司, 藤間功司, 馬場慎太郎：不規則波動場での透水層式護岸の越波に関する直接数値計算, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp. 976-980, 2008.
- 11) 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.
- 12) 内閣府沖縄総合事務局北部国道事務所：北部国道事務所メールマガジン(オンライン), Vol. 2, <http://www.dco.ogb.go.jp/hokkoku/roadmaga/2006/200607/index.html>, 参照 2008-02-07, 2006.
- 13) 中野 修, 興野俊也, 安田勝則, 藤井直樹：規則波・不規則波による傾斜堤の波力・越波伝達波への数値波動水路の適用性について, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 726-730, 2002.
- 14) 土木学会：水理公式集[平成 11 年度版], pp. 528, 1999.
- 15) 沖縄総合事務局開発建設部：土木工事設計要領, pp. 270-298, 2004.
- 16) 片岡保人, 塙 洋二, 竹鼻直人, 奥村昌好, 村上啓介：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, 2005.
- 17) 海岸保全施設技術研究会：海岸保全施設の技術上の基準・同解説, pp. 3-27~3-29, 2004.

- 18) 村上啓介, 新田純也, 真木大介, 上久保祐志, 片岡保人: 海水面上昇に対するフレア型護岸の越波阻止性能の保全に関する研究, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp. 821-825, 2008.

(2011. 10. 14 受付)

STUDY ON COUNTERMEASURES AGAINST WAVE OVERTOPPING AROUND ROAD REVETMENT USING NUMERICAL COMPUTATIONS UNDER IRREGULAR WAVE CONDITIONS

Koji KAWASAKI and Masami KIKU

Accuracy of wave overtopping rate under irregular wave conditions computed with a two-dimensional numerical wave flume 'CADMAS-SURF' was verified by comparing with hydraulic model experimental results. Furthermore, numerical examinations to determine the most efficient countermeasure against wave overtopping around road revetment were carried out using the CADMAS-SURF changing the shape and crest height of revetments under irregular waves. As a result, it was revealed that the CADMAS-SURF can reproduce not only wave deformation but also wave overtopping rate around revetments with complicated configurations. A numerical wave flume such as the CADMAS-SURF was, moreover, found to be useful in comprehensively discussing the prevention of wave overtopping disaster.