

大水深域非越波型護岸を対象とした 越波の数値シミュレーション

NUMERICAL SIMULATIONS ON WAVE-OVERTOPPING CHARACTERISTICS OF NON WAVE-OVERTOPPING TYPE SEAWALL IN DEEPWATER

山城賢¹・吉田明徳²・村上邦宏³・清水将貴⁴

Masaru YAMASHIRO, Akinori YOSHIDA, Kunihiro MURAKAMI and Masaki SHIMIZU

¹正会員 博(工) 九州大学大学院助教 工学研究院環境都市部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

²正会員 工博 九州大学大学院准教授 工学研究院環境都市部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

³学生会員 九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

⁴正会員 修(工) 株式会社大林組 (〒151-0051 東京都渋谷区千駄ヶ谷 5-24)

A Non Wave-overtopping Type Seawall in deepwater (NWTs), which effectively prevents wave-overtopping by its curved face, has been studied. To apply NWTs to real fields, however, it is necessary to sufficiently clarify the basic characteristics of wave-overtopping due to random waves. If a numerical simulation model is available to investigate the wave-overtopping characteristics of NWTs, whose cross sectional shapes need laborious work in experiments, a great deal of labor can be reduced. Therefore, in this study, CADMAS-SURF, which is a numerical model based on VOF method and is widely used in recent researches, practical design, etc., was used and its applicability to the estimation of the wave-overtopping characteristics of NWTs was investigated by comparing with the model experiments. The comparative investigation showed that CADMAS-SURF can fully estimate the wave-overtopping of NWTs and can be employed to investigate the wave-overtopping characteristics of NWTs.

Key Words : Non Wave-overtopping Type Seawall in deepwater, wave-overtopping, numerical simulation, model experiment, random wave

1. はじめに

著者らは、水深20m程度の大水深域を対象とし、図-1に示すような曲面形状を有する断面により波を効果的に沖側に返して、越波を防ぐ非越波型護岸を提案しており、これまでに行った検討から、本護岸が高い越波防止効果を期待できることを示した^{1), 2)}。しかしながら、将来的に本護岸を現地へ適用するためには、入射波や護岸断面形状、天端高等の種々の条件に対する越波特性を定量的に把握し、例えば合田らによる越波流量推定図³⁾のような基礎的な資料を整備することが重要であり、これまでの検討結果に加えて、様々な条件における系統的な検討が必要である。

従来、越波については水理模型実験による検討が主流であり、現在でも、護岸を新設するような場合には、重要な施設であるほど水理模型実験により性能を確認することが推奨されている⁴⁾。その一方で、近年、越波の検討においてVOF法等に基づく数値モデルが多用されており、直立護岸や消波護岸等について、十分な精度での越波の検討が可能となってい

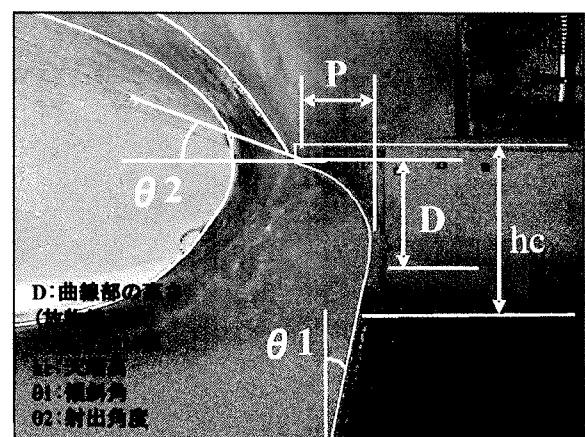


図-1 大水深域非越波型護岸

る⁵⁾。

本護岸の場合、断面形状が特殊なため、水理模型実験で越波特性を把握するためには、種々の条件を変えた模型を多数作成しなければならず、極めて多大な労力を伴う。したがって、本護岸に対してもVOF法等の数値モデルによる越波の検討が可能であれば、効率的に越波特性を把握することができる。

しかし、本護岸は、図-1に示すように大きな曲面によって波を薄い膜状にして勢いよく沖にはね返すという特徴を有しており、このような護岸に対してのVOF法で得られる越波流量の妥当性は定かではない。そこで本研究では、大水深域非越波型護岸の越波特性を把握する前段階として、VOF法による数値シミュレーションの妥当性について水理模型実験との詳細な比較により検証した。

2. 基本条件

大水深域非越波型護岸の断面形状は、図-1に示す5つのパラメーターにより決定する。本検討で対象とした断面形状は図-2に示す射出角 θ_2 が20度(Type-1)と45度(Type-2)の2断面であり、他のパラメーターは両断面で同じである。ただし、曲面は放物線形状であるため、射出角が変化すれば、曲面全体の形状も異なる。なお、これら2つの断面形状については、過去に規則波に対する越波特性を水理模型実験により検討しており、射出角が小さいほど越波防止効果が高いことを明らかにしている²⁾。天端高 h_c については、曲面部の高さを現地スケールで4mに固定し、護岸全体を底上げすることで2.66m、3.74m、4.82mの3通りに変化させた。また曲面部先端の厚みは0.2mとしている。海底地形は簡単のため水深15mで一様とし、マウンドも設けていない。入射波は有義波高 $H_{1/3}=4.5\text{m}$ 、有義周期 $T_{1/3}=8.7\text{s}$ の修正Bretschneider-光易型スペクトルを有する不規則波とした。したがって、一つの入射波条件について、断面形状が2ケース、天端高が3ケース($h_c/H_{1/3}=0.59, 0.83, 1.07$)の組合せによる全6ケースについて、数値計算と水理模型実験を実施した。

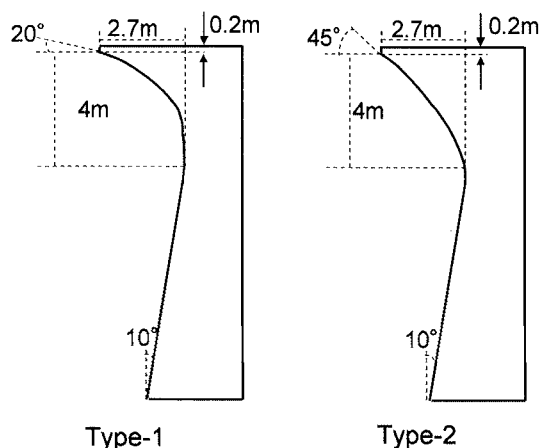


図-2 検討対象の護岸断面

3. 数値計算

(1) 計算格子の検討

数値モデルには、VOF法に基づく数値波動水路

CADMAS-SURF Ver.4.0⁶⁾を使用した。数値計算を行なうにあたり、まず、セルのサイズによる影響について検討した。図-3に計算領域を示す。入射波は造波ソースにより造波し、沖側に有義波の波長($L_{1/3}=91.5\text{m}$)で2波長分の減衰帯を設置した。護岸の背後には越波柵を設け、越波柵に流入した水量から越波流量を求めた。護岸断面はType-1(射出角20度)で、天端高は $h_c=2.66\text{m}, 4.82\text{m}$ の2通りである。この計算領域に対して、護岸の曲線部が最も細かいセルになるよう可変格子を採用し、図中に示すように3通りにセルを設定した(便宜上、粗格子、中格子、細格子と呼ぶ)。有義波の波長と水平方向の格子間隔との比($L_{1/3}/\Delta x$)および有義波高と鉛直方向の格子間隔との比($H_{1/3}/\Delta z$)は表-1に示すとおりである。

CADMAS-SURFのセルサイズの設定については、一般的な推奨値があるが、越波や波の打上げのような複雑な現象を対象とする場合、特に護岸近傍については、問題に応じてより細かなセルを用いる必要があることが指摘されている⁵⁾。本検討における設定は、一般的な推奨値に比べて十分に小さいといえる。また、CADMAS-SURFによる越波の計算を検討した報告⁵⁾では、越波を精度よく計算するためには、護岸表面にポーラスを設定しない方が良いとされているが、本護岸では、滑らかな曲面の断面形状が最も特徴的な部分であるため、護岸表面にはポーラスを設定し、できるだけ曲面形状を忠実に再現するようにした。

造波信号(マトリックスデータ)の作成には、藤原の方法⁷⁾を用いている。計算では、まず、図-4に示すように護岸を除いた一定水深の計算領域を設定し、護岸が設置される位置で2ヶ所(計測位置の間隔は8m)の水面変動を計測して、入射波分離推定法により入射波のスペクトルを求め、造波信号を調整して入射波スペクトルの合わせ込みを行った後、護岸を設置して越波の計算を行なった。なお、計算時間は有義波で120波とし、最初の $20T_{1/3}$ を除いた $100T_{1/3}$ 間で越波流量を求めた。その他の主なパラメーターは表-2に示すとおりに設定し、それ以外はデフォルトの設定を使用した。

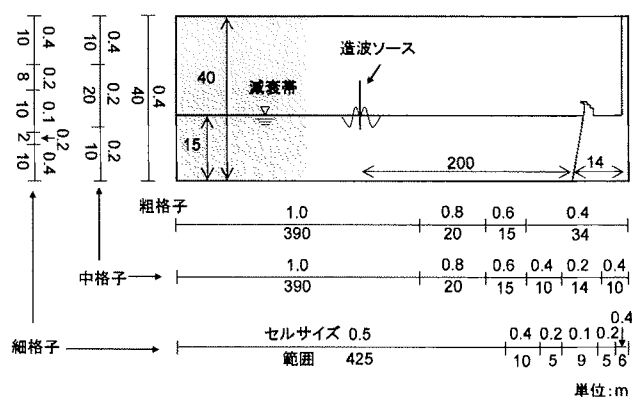


図-3 計算領域

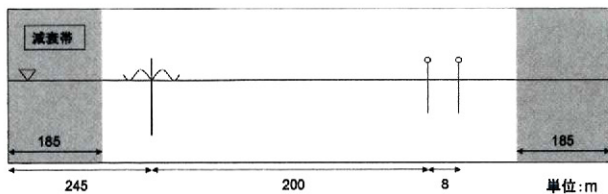


図-4 計算領域（入射波の検定）

表-1 設定したセルのサイズ

	$L_{1/3} / \Delta x$	$H_{1/3} / \Delta z$
粗格子	92 - 229	11 - 15
中格子	92 - 458	11 - 23
細格子	183 - 915	11 - 45

表-2 計算条件

時間制御	自動(安全率0.2)
造波モデルデータ	MATRIX
造波ソース	245m
水深	15m
有義波高	4.5m
有義周期	8.7s
開境界	放射境界
減衰領域	沖側に2波長分を設定
差分スキーム	VP-DONOR 0.2
ポララス値の下限	1.0D-4

図-5 に天端高 $hc=2.66\text{m}$ ($hc/H_{1/3}=0.59$) について、セルのサイズに対する越波流量と計算時間を示す。セルのサイズは、護岸断面の曲面部近傍に設定した最も細かいセルの水平格子間隔と入射波の有義波の波長との比 ($L_{1/3}/\Delta x$) を代表値として横軸に取っている。図より、中格子の場合に越波流量が小さく、粗格子や細格子に比べると半分程度となっている。図-6 は同じ条件について、同時刻における越波の状況を比較したもので、格子が小さいほど越波の状況を滑らかに再現している。しかし、細格子では計算が不安定になりやすく、図に示すケースは辛うじて120周期の計算を完了したものの、計算中に過大な越波が生じていたため、越波流量は大きめに算定されたものと思われる。また、計算時間を比較すると、粗格子で7時間、中格子で72時間、細格子で約700時間(29日)であった。本研究の最終的な目的は、大水深域非越波型護岸の越波特性を把握し、現地適用に資する基礎資料を整備することであり、水理模型実験を補間するために数値計算モデルの利用を考えていることから、膨大な計算時間を要するセルの設定では、多数の計算を実行することが難し

い。そこで、計算時間との兼ね合いから、以後の検討では、中格子の設定を採用した。

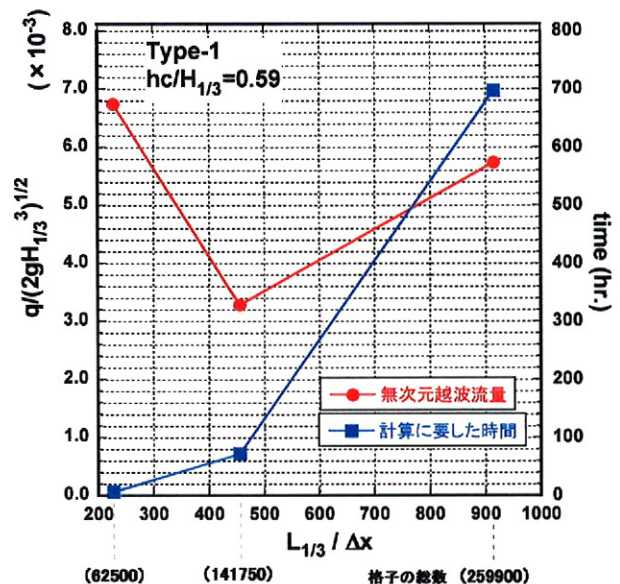


図-5 セルのサイズと越波流量および計算時間の関係

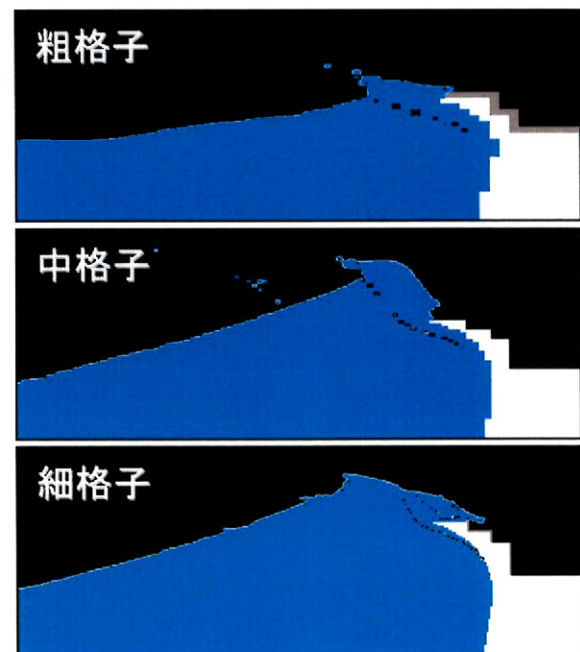


図-6 同時刻における越波の様子（上：粗格子，中：中格子，下：細格子）

(2) 越波流量の計算

2種類の断面形状と3種類の天端高の組合せの全6ケースについて、本計算を実施した。本計算においても、計算の安定性を考慮して1回の計算時間を $120T_{1/3}$ とし、目標のスペクトルから波形が異なる11波群（便宜上、一つの入射波を1波群と呼ぶ）の入射波を作成して、1ケースあたり11回の計算を行った。なお、前述の手順で、全ての波群についてスペクトルの合わせ込みを行ない、全ての波群について図-7に示す程度に目標スペクトルと一致することを確認している。越波流量は波群毎に最初の

20 $T_{1/3}$ を除いた100 $T_{1/3}$ 間で算定した。その他の計算条件はセルの検討の計算と同じである。

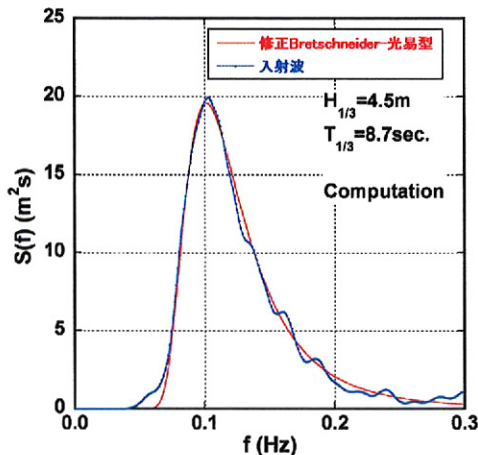


図-7 数値計算における入射波のスペクトル

4. 水理模型実験

水理模型実験は、図-8に示すように反射吸収式二次元造波水路に縮尺1/45で模型を作成し実施した。ただし、造波装置の部分が高くなるよう海底地形を作成している。入射波は、有義波高 $H_{1/3}=10.0\text{cm}$ 、有義周期 $T_{1/3}=1.3\text{s}$ であり、計算と同様に同一のスペクトルから波形が異なる波群を作成した。ただし、実験では、造波時間が120 $T_{1/3}$ では短く、特に越波流量が小さいケースでは実験結果の精度が低くなること、また、数多くの波群について入射波スペクトルを合わせ込むことに多大な労力を要することから、1波群につき、5分間造波して最初の1分間を除いた4分間（約185 $T_{1/3}$ ）で越波流量を求めることとして、全体で、計算と同程度の約1100 $T_{1/3}$ 間での越波流量が得られるよう6波群を作成した。

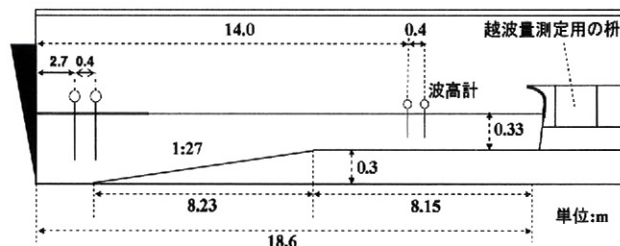


図-8 実験装置

実験においても、まず、護岸を除いた状態で、護岸設置位置での水面変動を計測し、入反射波分離推定法により入射波のスペクトルを求め、造波信号を調整して合わせ込みを行った。ただし、水理模型実験では、護岸を設置して造波した場合に、造波装置が反射吸収機能を有していても、入射波が変化することがあるため、図-8に示すように護岸の沖側で水位変動を記録して、実験ケース毎に入射波のスペクトルを確認し、目標のスペクトルと一致しない場合

には、護岸を設置した状態で、入射波スペクトルの合わせ込みを再度行い、実験の精度を確保するよう努めた。実験における入射波のスペクトルの例を図-9に示す。全ての実験ケースで、図に示す程度に入射波スペクトルが目標スペクトルに一致するまで合わせ込みを行った。なお、図に示す入射波スペクトルの高周波数帯は、波高計の間隔との関係で入反射波分離推定法の精度が低下するため除いている。また、越波流量については、護岸背後に越波柵を設置し、前述のとおり、造波開始1分後からの4分間で越波柵に流入した水量を計測して求めた。

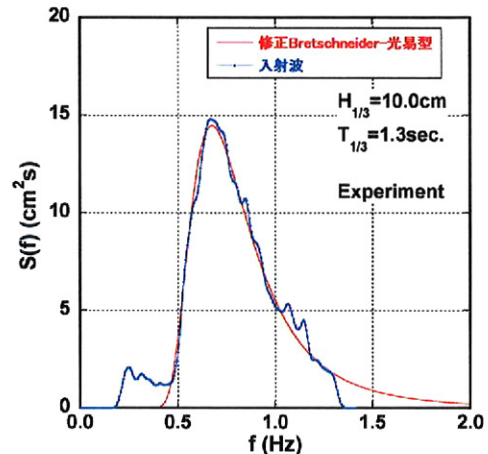


図-9 水理模型実験における入射波のスペクトル

5. 数値計算結果と実験結果との比較

(1) 波群による越波流量の変動性

越波流量の計算結果の妥当性は、断面形状と天端高の組合せの各ケースについての11波群による越波流量の平均値により議論するが、まず、各波群による越波流量の変動の程度を調べた。図-10にType-1（射出角20度）、相対天端高 $hc/H_{1/3}=0.59$ および1.07の条件における無次元越波流量（入射波の有義波高 $H_{1/3}$ により無次元化）の計算結果と実験結果を示す。計算結果は11波群のそれぞれで算定した100 $T_{1/3}$ 間での越波流量とそれらの平均値であり、実験結果は同様に6波群のそれぞれで算定した185 $T_{1/3}$ 間での越波流量と平均値である。越波流量は波群によって変動しており、変動の幅は、 $hc/H_{1/3}=0.59$ の場合、計算結果が平均値の0.7倍から1.6倍、実験結果が0.8倍から1.2倍で、 $hc/H_{1/3}=1.07$ の場合では、計算結果が平均値の0.2倍から2.6倍、実験結果が0.1倍から2.0倍であり、よく知られているように、越波流量が小さいほど変動の幅は大きくなっている。ただし、どちらの条件においても、実験結果の変動幅のほうが小さく、これは実験での1波群の作用波数が計算に比べて倍近く多いためである。

図-11に各ケースについて波群毎の越波流量の変動係数を示す。変動係数は天端高の増加に伴い大きくなっていることから、越波流量が小さいほど変動

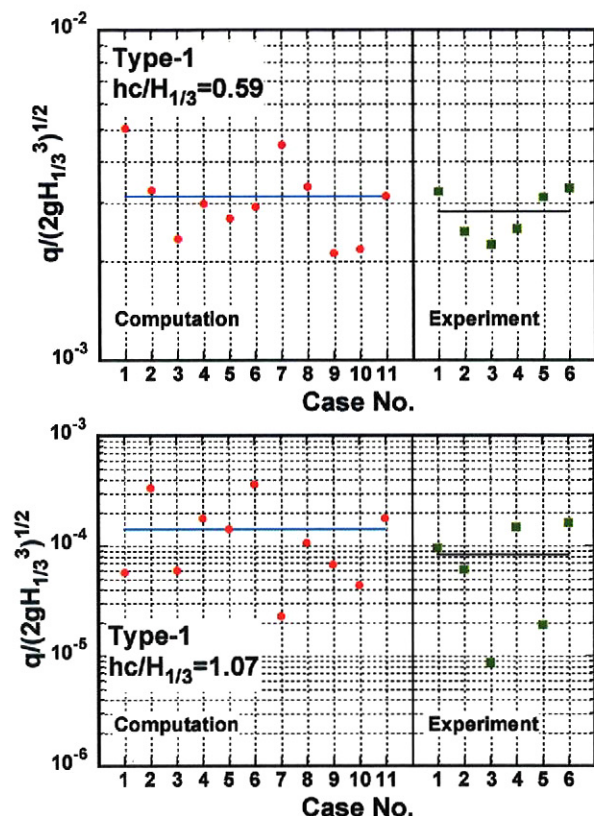


図-10 入射波の波群による越波流量の変動

の幅が大きいという一般的な傾向を示していることがわかる。また、計算の変動係数が実験に比べて大きく、これは、前述のとおり、1波群あたりの作用波数が計算と実験で異なるためと考えられる。断面形状で比較すると、天端高の増加につれ変動係数の差が顕著になることから、越波流量が小さい場合には、越波流量の変動の大きさに断面形状が影響するものと推測される。全体的に、変動係数は計算と実験で同じように変化しており、波群による越波流量の変動性は、計算と実験でほぼ同様と考えられる。

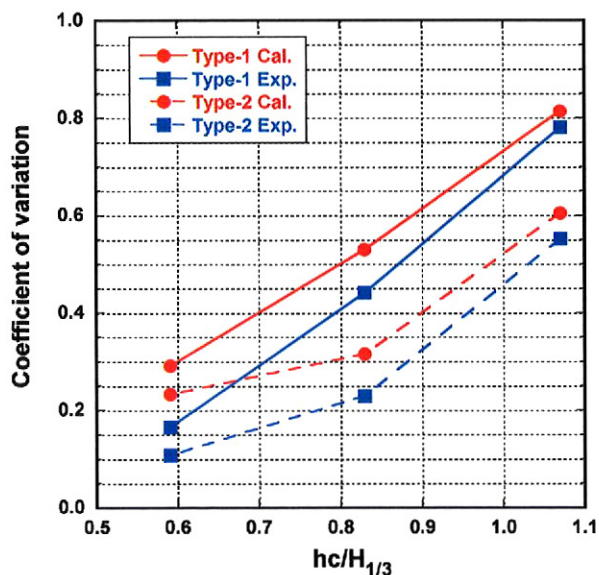


図-11 越波流量の変動係数

(2) 越波流量の比較

図-12に各断面形状について、越波流量の計算結果と実験結果との比較を示す。越波流量は、計算は11波群、実験は6波群の平均値で、すなわち、計算、実験ともに1, 100 $T_{1/3}$ 間で求めた値である。なお、計算結果と実験結果はともに、入射波の有義波高で無次元化している。全体的には計算結果と実験結果はほぼ同程度といえよう。断面形状による違いをみると、射出角が大きい断面（射出角45度、Type-2）の方が良く一致している。

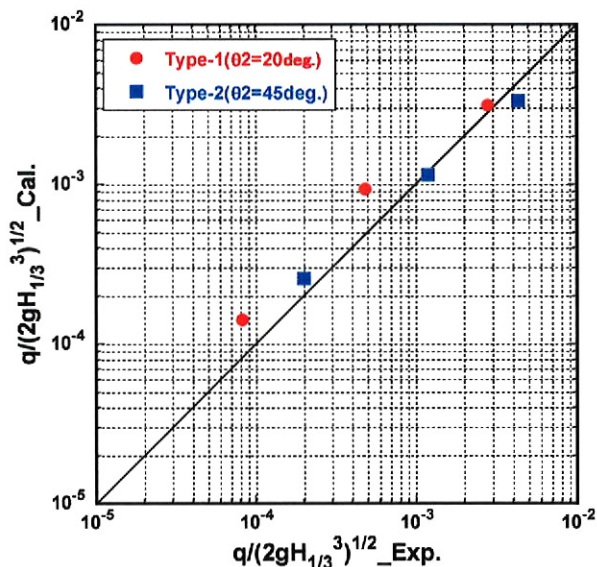


図-12 計算結果と実験結果の越波流量の比較

図-13は、計算結果と実験結果との比を入射波の有義波高に対する相対天端高について示したものである。大まかな傾向としては、天端高が高くなり、越波流量が少なくなると計算結果と実験結果の差が大きくなるように見えなくも無いが、明らかではな

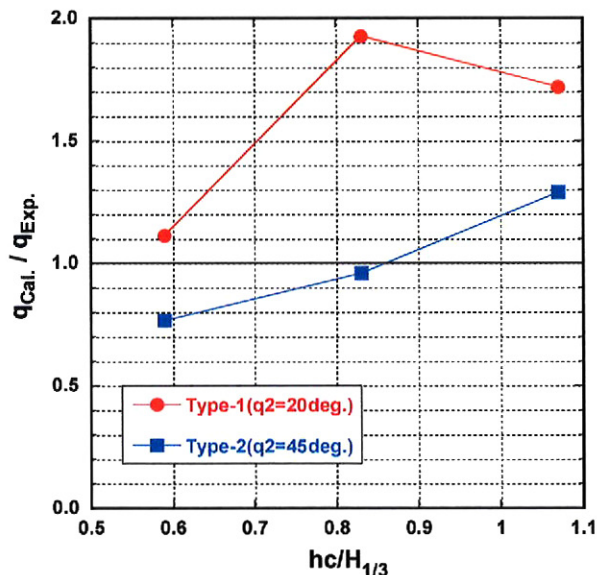


図-13 相対天端高に対する計算結果と実験結果の比

い。図-12に示したように、今回の検討では、無次元越波流量のオーダーが 10^{-4} から 10^{-2} であり、その範囲であれば、計算結果は実験結果と同等の精度であるといえよう。したがって、VOF法に基づく数値波動水路CADMAS-SURFは、大水深域非越波型護岸の越波流量の検討において、水理模型実験を補間する手段として有用であることが確認された。

6. 大水深域非越波型護岸の越波特性

今回の検討では、数値計算の妥当性に注目しており、本護岸の不規則波に対する越波特性を把握するには検討ケースが不十分であるが、ここでの計算結果と実験結果から、大水深域非越波型護岸の越波特性について、若干の考察を加える。図-14に天端高と越波流量の関係を示す。図より、断面形状によらず天端高が高くなるにつれて指数関数的に越波流量が減少することが分かる。また断面形状による越波流量を比較すると、射出角が小さいType-1の断面形状の越波防止効果が高いことが分かる。これは過去に行った規則波による検討結果²⁾と同じ傾向を示しており、妥当な結果といえる。

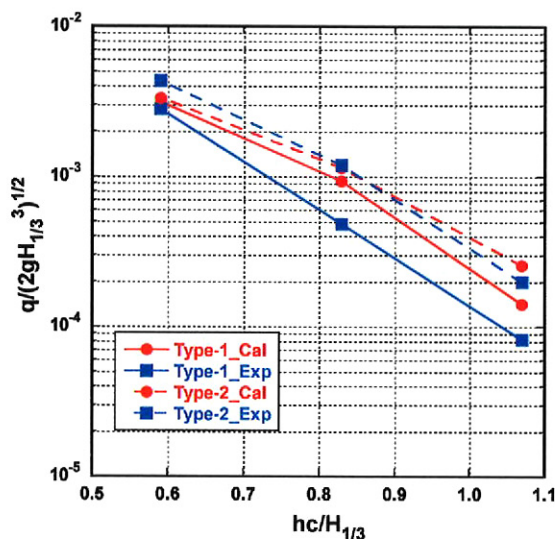


図-14 相対天端高に対する越波流量の変化

7. おわりに

VOF法に基づく数値波動水路CADMAS-SURFを、大きな曲面を有する大水深域非越波型護岸の越波の検討に適用し、水理模型実験の結果と比較して、無次元越波流量が 10^{-2} から 10^{-4} 程度の範囲において、十分な精度で計算できることを確認した。このように無次元越波流量の比較的広い範囲でCADMAS-SURFの適用性が確認できたことから、今後は、様々な断面形状について、水理模型実験と数値計算により大水深域非越波型護岸の越波特性を詳細に検討し、現地適用に資する基礎資料を整備する予定である。

参考文献

- 1) 山城 賢, 吉田明徳, 久留島暢之, 井ノ口洋平, 入江 功: 大水深域における非越波型護岸の開発, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 641-645, 2003.
- 2) 橋本裕樹, 山城 賢, 吉田明徳, 上谷佳寛, 森屋陽一, 越智宏充: 大水深域非越波型護岸の基本的越波特性について, 海洋開発論文集, 第 22 巻, pp. 283-288, 2006.
- 3) 合田良實, 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. 3-41, 1975.
- 4) 合田良實: 耐波工学, 鹿島出版会, 2008.
- 5) 財団法人沿岸技術研究センター: CADMAS-SURF 実務計算事例集, 沿岸開発技術ライブラリー, No. 30, 306p, 2008.
- 6) 財団法人沿岸開発技術研究センター: 数値波動水路の研究・開発, 沿岸開発技術ライブラリー, No. 12, 296p, 2001.
- 7) 藤原隆一: 数値波動水路内で線形理論を用いて発生させた不規則波の特性及び適用限界に関する一考察, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 41-45, 2005.