

マウンド上に設置されたフレア型護岸の 水理特性に関する実験と数値解析

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSES OF HYDRAULIC
CHARACTERISTICS OF THE FLARING SHAPED SEAWALL ON THE MOUND

勝田貴志¹・片岡保人²・埴 洋二³・濱崎義弘⁴・竹鼻直人⁴・村上啓介⁵

Takashi KATSUTA, Yasuto KATAOKA, Yohji HANAWA,
Yoshihiro HAMAZAKI, Naoto TAKEHANA, Keisuke MURAKAMI

¹工修(株)神戸製鋼所 機械研究所 流熱技術研究室 (〒651-2271 神戸市西区高塚台 1-5-5)

²正会員 工博(株)神戸製鋼所 機械研究所 構造強度研究室 (〒651-2271 神戸市西区高塚台 1-5-5)

³正会員 工修(株)神戸製鋼所 機械研究所 構造強度研究室 (〒651-2271 神戸市西区高塚台 1-5-5)

⁴正会員 工修(株)神戸製鋼所 機械エンジニアリングカンパニー 構造技術部
(〒657-0845 神戸市灘区岩屋中町 4-4-8)

⁵正会員 工博 宮崎大学助教授 工学部 土木環境工学 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1)

Flaring Shaped Seawall (FSS) can drastically reduce a crest height and wave overtopping volume in comparison with a conventional upright one, and a top area of the FSS can be used effectively. In this study, hydraulic experiments and numerical simulations for the FSS on the mound have been carried out using a two-dimensional flume model. As a result, the wave overtopping rate and flow velocity by the numerical simulations are in agreement with those by the experiments. Good agreement between numerical results and experimental ones is found in not impulsive wave pressure. However, it is necessary to investigate an impulsive wave pressure furthermore.

*Key Words : Flaring Shaped Seawall, numerical analysis, wave overtopping rate,
flow velocity, wave pressure*

1. はじめに

外洋に面した空港、発電所などの重要施設や、臨海部の汀線に沿って建設される道路用護岸では、越波を極力低減したいという要求が強い。著者らはこれまで、図-1に示すような、護岸前面が円弧形状で沖側に張り出したフレア型護岸^{1)~4)}を提案し、従来の直立護岸や消波ブロック被覆護岸に比較して低天端でありながら、越波を大幅に低減でき、かつ護岸天端上を有効利用できることを示してきた。

一方、近年護岸等の各種海岸構造物に作用する波浪現象を数値シミュレーションによって表現し、解明しようとする試みがなされてきている^{5)~7)}。著者らも空隙率傾斜型人工リーフ⁸⁾や海水交換型スリットケソン⁹⁾について数値シミュレーションによる波浪現象の解析を試みてきた。

本報では、フレア型護岸を実用に供する際のことを考え、捨石マウンド上に設置した場合の水理実験を行い、越波流量、波圧などの各種水理特性について調べた。また、実験とともに数値解析も実施し、実験結果と比較することによりその妥当性について検討した。

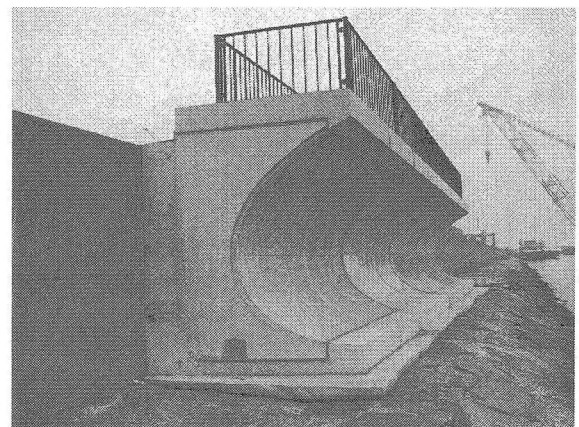


図-1 フレア型護岸の試験設置例

2. 実験モデルおよび実験条件

水槽実験は、2次元吸収制御式造波水槽(長さ30m、高さ1.2m、幅0.6m)中に1/10海底勾配を模擬した塩

化ビニル製の不透過斜面を置き、捨石マウンド上に塩化ビニル製のフレア型護岸モデルを設置した(図-2 参照)。捨石マウンドは2~5cm 程度の径の石を敷き詰め、形状が崩れないように表面を金属網で覆った。堤体前面端でのマウンド高さは現地緒元で0.8m である。

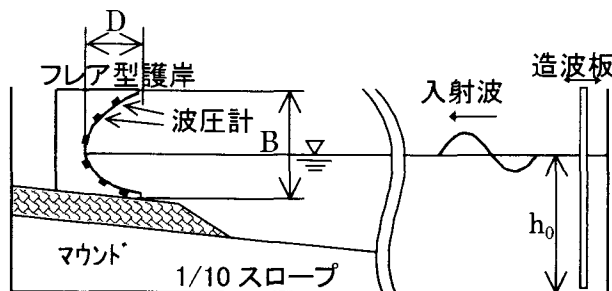


図-2 実験状況の概要

護岸モデルの高さは23cm を基本とし、一部高さ15cm のものも用いている。これは縮尺でいえば1/15~1/23 で、現地護岸高さは3.5m を想定している。フレア型護岸の形状は図-2 のようにフーチング(下部の迫り出し)を設けており²⁾、護岸の円弧部奥行き深さD と護岸高さB の比は $D/B=0.52$ とした。また、水槽の沖側(造波板側)水深は $h_0=67\text{cm}$ とした。

実験条件を表-1 に示す。これらの値は現地緒元で示しており、Mx.H.W.L.+4.5m 時の堤体前面端での水深は2.6m である。ここで、Mx.H.W.L.は既往最高潮位、H.W.L.は朔望平均満潮位である。計測項目は、①越波流量、②反射率、③波圧・波力、④流速の4項目である。上記①、②は不規則波(表-1中の波高は換算沖波波高)で、③、④は規則波で実験した。不規則波は、修正 Bretschneider-光易型の周波数スペクトルを基準とし、作成した波の入射波のスペクトルがこれとほぼ一致するようにした。ここで、入射波は、造波板から7m 岸側に2本の波高計を設置し、入反射分離¹⁰⁾により求めた。不規則波は造波開始1分後から11分間(有義周期の波が200波以上入る時間)の波をひとつの波群とした。

越波流量は、護岸モデル上に30cm 幅の水路を設け、岸側容器に越波水を回収し、単位時間、単位幅あたりの量を算出した。越波流量は2回計測し、平均値を求めた。また、護岸の反射率¹⁰⁾も同時に計測した。

波圧測定は、受圧面直径が8mm の小型圧力計を用い、図-2 に示したように波圧計をほぼ等間隔となるよう護岸前面の中心線上に配置した。また同時に3分力計による波力も測定した。計測はカットオフ周波数500Hz のローパスフィルターを通し、サンプリング周波数1kHz でデジタル収録した。

流速測定には時定数0.1sec.の電磁流速計を用いた。流速測定点については後述する。

表-1 実験条件(現地緒元)

	潮位 (m)	波高 (m)	周期 (s)
①越波流量	Mx.H.W.L. +4.5	1.95	5.27
②反射率	Mx.H.W.L. +4.5	1.95	5.27
	H.W.L. +3.33		5.27
③波圧・波力	Mx.H.W.L. +4.5	3.0	5.27
		3.5	5.27
④流速	H.W.L. +3.33	1.29	4.2

3. 数値解析手法と計算条件

流体の解析には2次元非定常の Navier-Stokes 方程式、波の形状を表すため2相流モデルのVOF 法¹¹⁾を使用した。

フレア型護岸に関する計算領域の概略を図-3 に示す。フレア型護岸の岸側後方に貯水槽を設置し、護岸を飛び越えた越波量を計測できるようにした。継続的に長時間にわたって安定した入射波を造波させるために造波境界に無反射造波板のモデルを適用した¹²⁾。

計算領域のセル分割数は沖浜方向500、深さ方向100、全体で50000 である。最小要素セル幅は深さ方向に200mm である。

非定常計算での時間刻み幅 Δt は0.005sec.と設定し、計算時間はいずれのケースも100sec.である。水位はH.W.L.+3.33m とMx.H.W.L.+4.50m の2種類とした。水位、波長、波周期、波高などの波浪条件は計測対象ごとにそれぞれ異なるのでそのつど示す。

なお説明の中で頻繁に使用する記号を以下に示す。 t : 時間, ρ : 海水の密度, g : 重力加速度, L : 波長, T : 波周期, H : 波高, P : 護岸に作用する圧力。

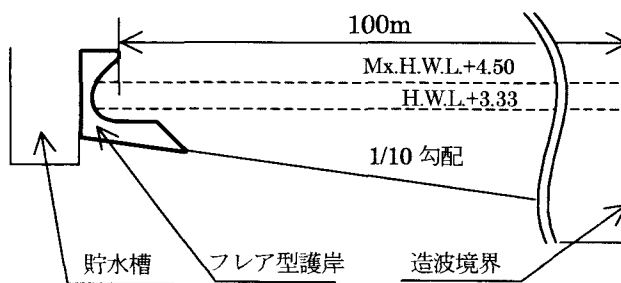


図-3 フレア型護岸の概略図

4. 結果と考察

(1) 越波流量

実験においては不規則波を発生させて越波流量を得た。同様に数値計算においても不規則波を発生させて

越波流量を求めるべきであるが、不規則波の計算には長い計算時間を要する。そこで合田ら¹³⁾が提案した越波流量の簡易算出法を用いて期待越波流量を求めた。期待越波流量は式(1)に示すように波高 H の規則波における越波流量とその波浪の発生確率密度との積の重ね合わせから推定される値である。

$$q_{\text{exp}} = \int_0^{\infty} q(x) \cdot p(x) dx \tag{1}$$

ここで、 q_{exp} ：期待越波流量、 $x = \frac{H}{\bar{H}}$ 、 $\bar{H} = \frac{H'_0}{1.6}$ ：平均波高、 H'_0 ：換算沖波波高、 $q(x)$ ：波高 H の規則波における越波流量である。また、波高 H の波浪の発生確率密度 $p(x)$ は式(2)に示すレーリー分布を用いた。

$$p(x) = \frac{\pi}{2} \cdot x \cdot \exp\left(-\frac{\pi}{4} x^2\right) \tag{2}$$

表-2 に示す条件で10ケースの規則波計算を実施し、それぞれの計算から得られた越波流量をもとに式(1)の期待越波流量を求めた。計算時間は造波境界で波を発生させ始めてから100sec.である。図-3 に示す護岸後方に貯水槽を設け、護岸直上を飛び越えてその貯水槽に流入した海水量を越波量とした。計算開始後第1波が護岸直前に到達してから計算終了までを計測時間として、越波量をその計測時間で除して単位時間あたりの越波流量を求めた。

表-2 計算条件

水位	Mx.H.W.L.+4.50m
波長	43.33m
波周期	5.27s
沖波換算波高	1.95m
波高	2.2m, 2.4m, 2.6m, 2.8m, 3.0m, 3.2m, 3.4m, 3.6m, 3.8m, 4.0m

表-3 に実験の結果得られた越波流量と計算の結果得られた期待越波流量を示す。また、図-4 にそれぞれの波高における越波量の時刻歴の比較を、表-4 にそれぞれの波高における計算終了時の越波量を示す。計算で得た期待越波量は実験結果の1.7倍以内に収まった。実験では $H=2.4\text{m}$ の時に越波がなかったが、これに対して計算でも $H=2.4\text{m}$ で $0.36\text{m}^3/\text{m}$ しか越波せず、 $H=2.2\text{m}$ では全く越波がなかった。このように越波を生じる波高も概ね実験結果と計算結果とは一致した。図-4 の越波量の時刻歴を見ても分かるように、越波は比較的ばらつきの大きい現象である。それに対して計算結果は実験結果と概ね一致したと言える。

表-3 越波流量の実験結果と計算結果の比較

実験結果	$1.13 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{m/s}$
計算結果	$1.91 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{m/s}$

表-4 計算結果の越波量

波高	越波量	波高	越波量
2.2m	$0.00\text{m}^3/\text{m}$	3.2m	$6.43\text{m}^3/\text{m}$
2.4m	$0.36\text{m}^3/\text{m}$	3.4m	$7.86\text{m}^3/\text{m}$
2.6m	$2.77\text{m}^3/\text{m}$	3.6m	$6.12\text{m}^3/\text{m}$
2.8m	$4.41\text{m}^3/\text{m}$	3.8m	$10.5\text{m}^3/\text{m}$
3.0m	$4.35\text{m}^3/\text{m}$	4.0m	$11.0\text{m}^3/\text{m}$

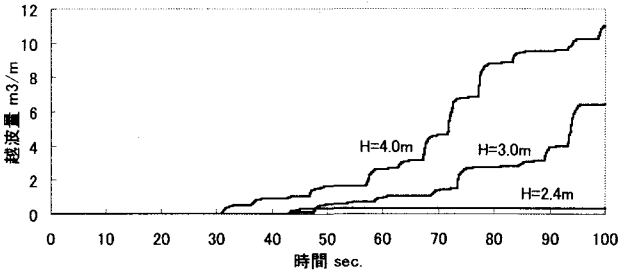


図-4 計算結果の越波量の時刻歴

(2)反射率

表-5 に示す条件で計算を実施した。ここで、実験は換算沖波波高 $H'_0=1.95\text{m}$ の不規則波を用いたが、計算では $H=1.95\text{m}$ の規則波を用いた。反射率は合田ら¹⁰⁾の入・反射波の分離推定法を用いて求めた。

表-5 計算条件

水位	H.W.L.+3.33 Mx.H.W.L.+4.50
波長	43.33m
波周期	5.27m
波高	1.95m

表-6 に反射率の実験結果と計算結果の比較を示す。Mx.H.W.L.に比べて H.W.L.の方の反射率が小さくなっている。これは、H.W.L.の場合の水位は底面に近く、波が碎波しやすいため、反射率も小さくなったものと考えられる。不規則波と規則波の違いもあり、計算結果は若干の違いはあるものの概ねこの傾向を表している。

表-6 反射率の実験結果と解析結果の比較

	実験結果	計算結果
H.W.L.	0.31	0.18
Mx.H.W.L.	0.45	0.46

(3)護岸に作用する波圧

表-7 に示す条件で計算を実施した。護岸上の圧力計測点10点の位置を図-5 に示す。マウンド底面より1.16m 上方の位置から0.3m ごと等間隔に10点をとった。圧力 P の時刻歴は図-6 のように周期的に変動

する。各計測点の圧力を護岸上で積分して水平荷重の時刻歴を得る。その水平荷重が1周期中で極大となる時間における各計測点の圧力を数波にわたって平均した値を各計測点の圧力の最大値とした。なお、実験においては波圧計による波圧計測と3分力計による波力計測を同時に実施したが、波圧計による値を積分した波力と3分力計による波力はほぼ一致することを確認している。

表-7 計算条件

水位	Mx.H.W.L. +4.50
波長	43.33m
波周期	5.27s
波高	3.0m, 3.5m

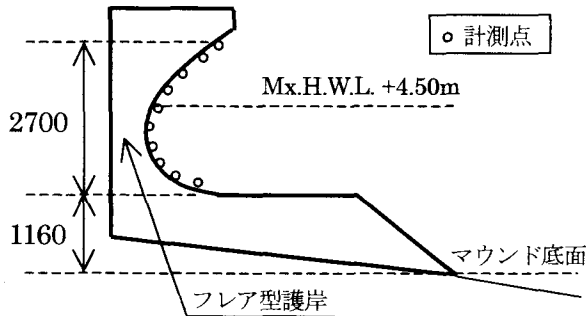


図-5 護岸上の圧力計測点の位置

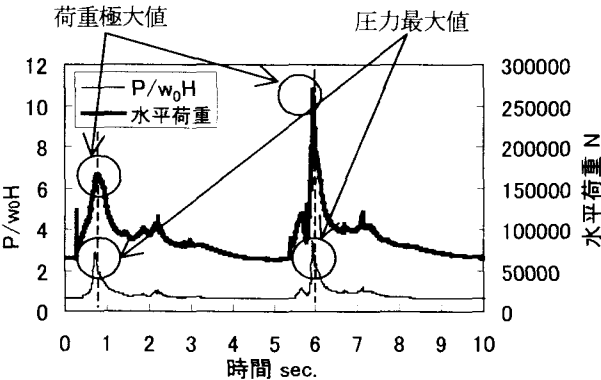


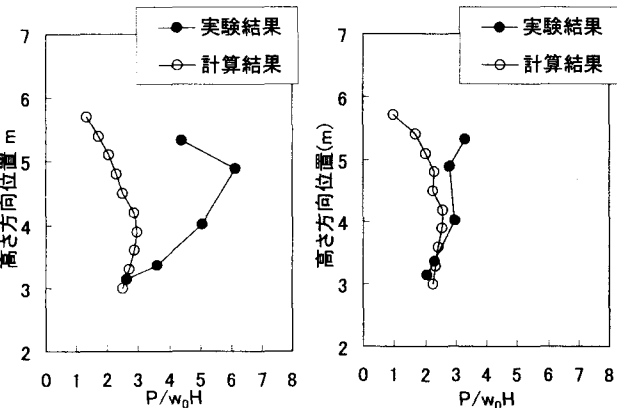
図-6 最大圧力の定義

図-7 に計測点における圧力の最大値の実験結果と計算結果の比較を示す。圧力 P は $w_0 H$ で除した無次元値で比較した。また、図-8,9 に圧力の時刻歴波形の実験結果と計算結果との比較を示す。ここでは静水面の直上にある計測点の時刻歴波形を比較した。比較のため時間を波周期 T で除して時間軸を無次元化している。

$H = 3.0\text{m}$ の護岸上の圧力を比較すると実験結果は計算結果よりも2倍以上大きい。図-8の時刻歴波形を比較すると実験結果の波形は計算結果のそれよりも時間変化が大きい。これは護岸前面に相当大きな衝撃砕波圧が作用したものと考えられる。護岸へ向かってくる波は波高が高くなるといずれもその前方で崩れはじめて到達する。 $H = 3.0\text{m}$ の波が崩れはじめる位置は、波高が低いので $H = 3.5\text{m}$ のそれと比べて護岸に近い。そのため $H = 3.0\text{m}$ の場合、波が崩れきらないうちに護岸に到達し、空気をほとんど巻き込まずに水塊として衝突したため、実験結果のような大きな衝撃砕波圧が生じた

と考えられる¹⁴⁾。しかし、 $H = 3.0\text{m}$ と 3.5m という微妙な差が衝撃砕波圧の発生の有無に影響を与えるため、この現象は非常に特異であると言える。今回の計算ではその特異な現象を再現することができなかったのではないかと考えられる。

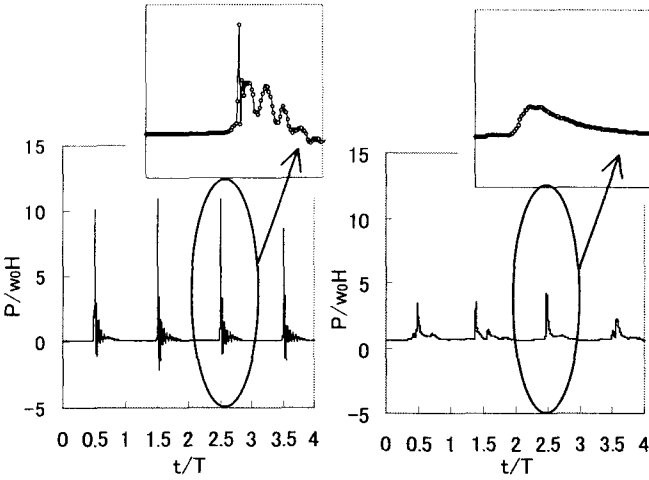
$H = 3.5\text{m}$ の護岸上の圧力を比較すると実験結果と計算結果は定性的によく一致しており、特に静水面下では定量的にも誤差20%以内に収まっている。図-9の時刻歴波形を比較すると実験結果の波形は $H = 3.0\text{m}$ の場合に比べて時間変化が小さく、衝撃砕波圧が作用していないため計算で十分に再現できたと考えられる。



(a) $H = 3.0\text{m}$

(b) $H = 3.5\text{m}$

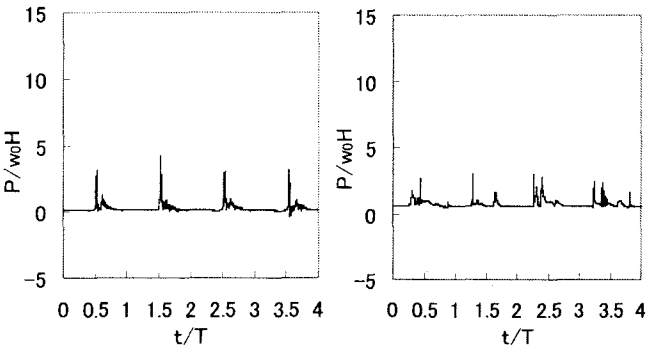
図-7 護岸上の圧力の実験結果と計算結果の比較



(a) 実験結果

(b) 計算結果

図-8 $H = 3.0\text{m}$ の場合の圧力時刻歴



(a) 実験結果

(b) 計算結果

図-9 $H = 3.5\text{m}$ の場合の圧力時刻歴

(4)護岸前面海底近傍の流速の解析

本報告のフレア型護岸は捨石マウンド上に設置される。捨石マウンドには空隙があり海水を透過させる。海底近傍の流速を計算で把握するためには捨石マウンドを不透過壁ではなく透過壁とするモデルを用いて計算する必要がある。そこで図-10に示す捨石マウンドの部分に式(3)に示す Eugun¹⁵⁾の方程式による充填層モデルを適用した。

$$\frac{\Delta p}{l} = -(\xi_1 |u_A| + \xi_2) u_A \quad (3)$$

ここで、 Δp ：圧力損失、 l ：マウンド厚、 ξ_1 ：速度の2乗に対する圧力損失係数、 ξ_2 ：速度の1乗に対する圧力損失係数、 u_A ：空塔速度。圧力損失係数 ξ_1 と ξ_2 はそれぞれ以下のようにマウンドの空隙率 ε と捨石の平均粒径 D_p より求まる。

$$\xi_1 = \frac{3.5(1-\varepsilon)}{D_p \varepsilon} \quad (4)$$

$$\xi_2 = \frac{D_p^2 \varepsilon^3}{150(1-\varepsilon^2)} \quad (5)$$

表-8に示す条件で計算を実施した。捨石マウンドの空隙率を簡易的に $\varepsilon=30\%$ 、捨石の平均径を0.7mとして求めた圧力損失係数 ξ_1, ξ_2 を用いた。比較のため空隙率 $\varepsilon=0.0\%$ 、すなわち捨石マウンドを不透過壁とした場合の計算も実施した。流速計測点の位置A,B,C,Dを図-10に示す。計測点高さは海底またはマウンド表面から50cm上方である。流速の時系列データは図-11のように周期的に変動する。正が沖向き、負が岸向きである。その1周期中で沖向きの極大値と岸向きの極大値をそれぞれ数波にわたって平均した値を各計測点の流速の沖向き最大値、岸向き最大値とした。

表-8 計算条件

水位	H.W.L. +3.33m
波長	27.5m
波周期	4.2s
波高	1.29m

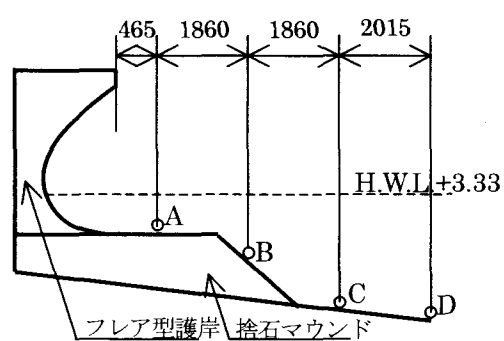


図-10 流速の計測点の位置

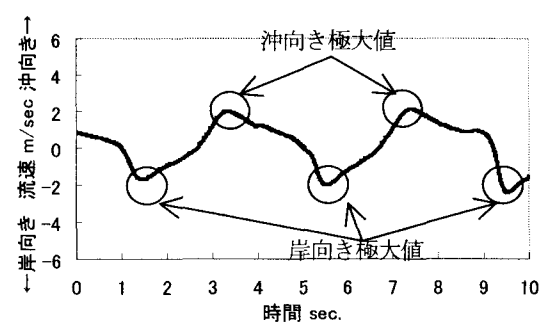


図-11 最大流速の定義

図-12,13に計測点における沖方向・岸方向の最大流速の実験結果と計算結果の比較を示す。図-12は空隙率 $\varepsilon=0.0\%$ の場合、図-13は $\varepsilon=30\%$ の場合の結果である。ただし、流速は波速で除した無次元値で比較した。

図-12に示すように捨石マウンドの空隙率を $\varepsilon=0.0\%$ とした場合、流速の極大値の解析結果は実験結果よりも全般的にかなり小さくなっている。これは解析の場合、 $\varepsilon=0.0\%$ 、すなわち捨石マウンドを不透過壁することで、壁面上での流速が0になり、その近傍での流れも抑えられるためと考えられる。これに対して、図-13に示すように $\varepsilon=30\%$ とした場合、沖方向の計算結果は実験結果と最大誤差25%以内に収まっており、定性的にも定量的にもほぼ一致している。また、岸方向のそれらも概ね一致している。このことより、捨石マウンドを有する護岸近傍の流速を解析する場合、マウンドの空隙率を考慮する必要があると考えられる。

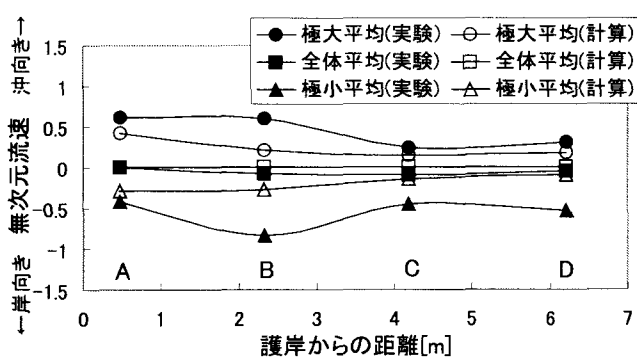


図-12 空隙率 $\varepsilon=0.0\%$ の場合の沖方向・岸方向の最大流速の実験結果と計算結果の比較

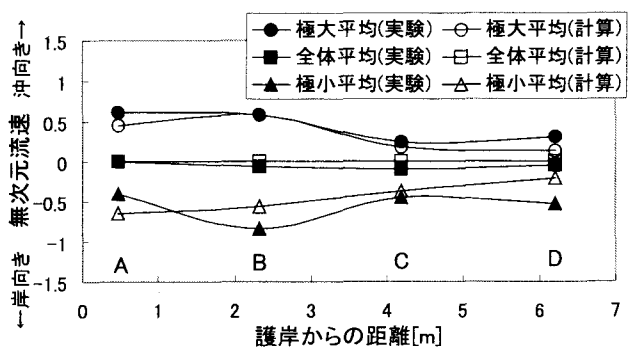


図-13 空隙率 $\varepsilon=30\%$ の場合の沖方向・岸方向の最大流速の実験結果と計算結果の比較

5. まとめ

フレア型護岸に対する水理実験および2次元非定常のNavier-Stokes方程式とVOF法を用いた数値解析を実施し、両者を比較することによって得られた主要な結果を以下に示す。

- (1) 期待越波流量の考え方にに基づき数値計算で求めた越波流量は、実験結果と概ね一致し、本手法でフレア型護岸の越波流量を実験結果との誤差2倍以内で推定できることがわかった。
- (2) 衝撃砕波圧が作用しない場合、数値解析によりフレア型護岸に作用する波圧を実験結果との誤差を20%の範囲内で推定できることがわかった。しかしながら、衝撃砕波圧が作用する場合は今後さらなる検討が必要である。
- (3) 護岸前面近傍の流速を解析する場合、捨石マウンドの空隙率を考慮した場合の方が考慮しない場合に比べて定性的にも定量的にも実験結果と良い一致を示した。特に冲向きの流速は実験結果との最大誤差を25%の範囲内で推定することができ、捨石マウンドの空隙率を考慮することにより、流速のより正確な評価が可能になることがわかった。

上に述べたように、数値解析によりある程度実現象を表現することはできたが、今後さらなる詳細な検討が必要と考えられる。

謝辞：本論文をまとめるにあたり、水理実験について港湾空港技術研究所耐波研究室下迫健一郎室長、漂砂研究室栗山善昭室長には多くの貴重なご助言を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 村上啓介, 入江功, 上久保祐志: 非越波型防波護岸の護岸天端高さ
と作用波圧について, 海岸工学論文集第43巻, pp.776-780, 1996.
- 2) 上久保祐志, 入江功, 村上啓介, 神田一紀: 護岸上の完全開放を
目的としたフレア型護岸の特性について, テクノオーシャン98論
文集, pp.129-132, 1998.
- 3) 市川靖生, 片岡保人, 竹鼻直人, 濱崎義弘, 入江功, 村上啓介: フ
レア型護岸の道路脇護岸への適用に関する基礎的検討, 海洋開発論
文集 Vol.16, pp.251-256, 2000.
- 4) 片岡保人, 市川靖生, 梅原健男, 竹鼻直人, 堀洋二, 入江功: フレ
ア型護岸の不規則波による水理特性の検討, 海洋開発論文集
Vol.17, pp.61-66, 2001.
- 5) 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.
- 6) 有川太郎, 磯部俊彦, 高橋重雄: VOF法を用いた衝撃砕波圧の計
算と適用性, 海岸工学論文集第48巻, pp.831-835, 2001.
- 7) 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・越波伝達率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.
- 8) 織田剛, 宇津野秀夫, 竹鼻直人, 奥村昌好: N.S.方程式を解くこと
によるスリット型構造物消波性能の数値解析, 海洋開発論文集
Vol.18, pp.323-328, 2002.
- 9) 中岡威博, 片岡保人, 濱崎義弘, 竹鼻直人, 奥村昌好: 海水交換型
スリットケーソンの3次元数値解析による水理特性の評価, 海洋
開発論文集 Vol.19, pp.577-581, 2003.
- 10) 合田良実: 港湾構造物の涌波設計, 鹿島出版会.
- 11) C.W.Hirt and B.D.Nichols, Jcomput. Phys., 39, 201-225, 1981
- 12) 川口隆: 波面検出及び速度制御を用いた無反射造波方式, 三井造
船技報, 第128号, pp.20-24, 1986.
- 13) 合田良実, 岸良安治, 神山豊: 不規則波による越波流量に関する
実験的研究, 港湾技術研究所報告, Vol.14, No.4, pp.3-44, 1975.
- 14) 高橋重雄, 谷本勝利, 鈴木論司: 直立壁に作用する衝撃
波圧の発生機構に関する一考察, 港湾技術研究所報告第
22巻, 第4号, pp.3-31, 1983.
- 15) S.Ergun. Fluid Flow through Packed Columns.
Chem.Eng.Prog., 48(2):89-94, 1952