

数値波動水路を用いた越波排水路を有する 低天端護岸の不規則波越波計算とその有用性

NUMERICAL SIMULATION OF IRREGULAR WAVE OVERTOPPING ON STEPPED SEAWALL WITH DRAINAGE USING NUMERICAL WAVE FLUME AND ITS UTILITY

有光 剛¹・安岡恒人²・川崎浩司³

Tsuyoshi ARIMITSU, Tsunehito YASUOKA and Koji KAWASAKI

¹正会員 博(工) 関西電力株式会社 電力技術研究所 (〒661-0974 尼崎市若王寺3-11-20)

²正会員 関西電力株式会社 電力技術研究所 (〒661-0974 尼崎市若王寺3-11-20)

³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)

A stepped seawall with drainage is one of the coastal structures for reducing wave overtopping. The accurate prediction of wave overtopping is of importance in order to design the seawall economically. However, the previous design diagrams for the estimation of wave overtopping rate cannot be used for the complex shape of a seawall.

The main purpose of this paper is to investigate irregular wave overtopping process on a stepped seawall with drainage and verify the utility of a two-dimensional numerical wave flume “CADMAS-SURF” by implementing hydraulic experiments and numerical simulations. The comparison of the numerical and experimental results reveals that the CADMAS-SURF can appropriately reproduce wave overtopping phenomena under irregular wave actions.

Key Words : Irregular wave overtopping, stepped seawall, numerical wave flume

1. はじめに

越波排水路を有する低天端護岸は、近年、大水深域に展開されつつある港湾施設や汽力発電所において要求される、越波流量の低減と構造物のスリム化を同時に満足する護岸断面の一つである。同形式の護岸では、天端上の波変形、排水路壁への水塊の衝突および越波といった複雑な水面挙動により、既往の越波流量算定図表¹⁾の適用は不可能である。筒井ら²⁾、著者ら³⁾は、このような複雑な形状に対する越波量算定のために、水理模型実験を実施している。

一方、水理模型実験に代わる耐波設計ツールとして数値計算の役割が高まりつつあり、榊山ら⁴⁾、佐貫ら⁵⁾、川崎ら⁶⁾は Euler 型モデルの代表的手法である VOF (Volume Of Fluid) 法を用いて、越波の数値計算を行っている。著者ら³⁾も、越波排水路を有する低天端護岸に対する越波計算を試み、複雑な形状の護岸の越波過程に対する数値計算の適用性について検討している。しかしながら、計算容量の制約等もあり、これらの数値計算は規則波を対象としており、護岸設計を検討する際、一般的に実施される不規則波実験との比較を行った事例はあまりない。

本研究では、数値波動水路 CADMAS-SURF^{7), 8)}を用いて、不規則波作用下での越波排水路を有する低天端護岸の越波計算を行い、越波特性を議論した上で、

CADMAS-SURF の有用性を水理実験により検証する。

2. 水理模型実験の概要

図-1 に、本研究で対象とした越波排水路を有する低天端護岸の断面を実スケールで示す。ケーソン前面壁から 20m 岸側に、水路幅 15m の越波排水路が設置され、その壁の高さは沖側で EL+12.5m、岸側で EL+13.0m である。

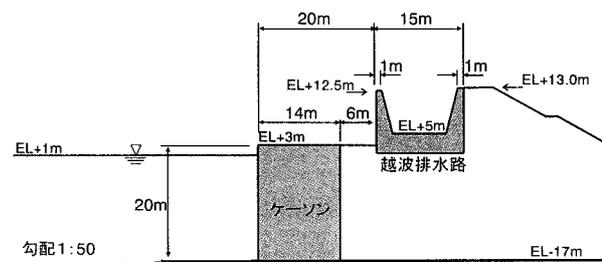


図-1 越波排水路を有する低天端護岸の断面図

水理模型実験は、図-2 に示す造波板から 13.7m の水平床と 17.5m の 1/50 一様勾配斜面を有する長さ 33m の二次元造波水路を用いて実施した。なお、一様水深部における静水深は 0.7m で、模型縮尺は

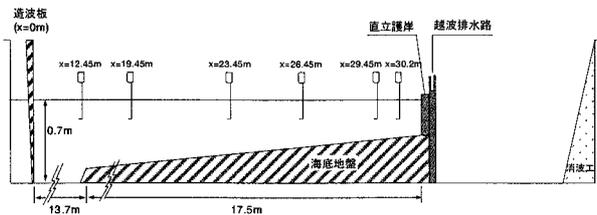


図-2 二次元造波水路を用いた水理模型実験の概要図

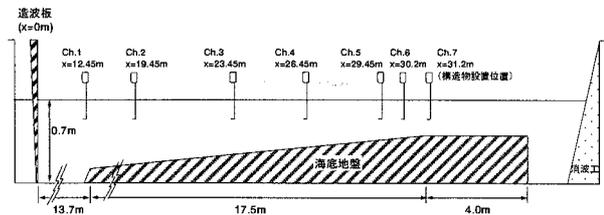


図-4 通過波検定時の実験条件

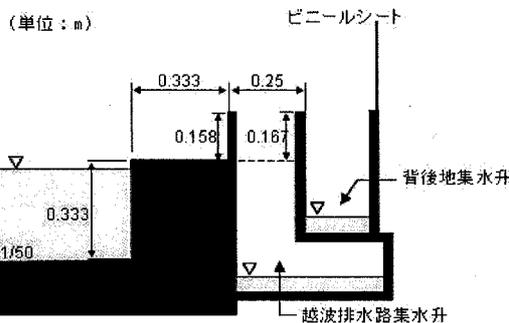


図-3 護岸周辺の模型概要

1/60 とした。

沖側から護岸周辺までの波浪変形特性を把握するため、図-2 に示すように、容量式波高計を 6 本設置し、最も沖側の波高計で測定される波高を沖波波高とした。図-3 に水理模型実験で用いた護岸模型の概要を示す。2 個の集水升を岸沖方向に並列に設置し、造波終了後に増加した水量を計測し、越波排水路への流入量と越波排水路背後地への流入量をそれぞれ算定した。集水升を越えて飛散する飛沫については、岸側の越波排水路背後地用の集水升に含まれるように、越波升背後にビニールシートを展張した。実験条件は表-1 に示す 2 ケースとし、修正 Bretschneider・光易型の周波数スペクトルを有する不規則波を造波した。

表-1 実験条件

ケース	$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)
1	13.1	1.5
2	16.4	1.7

3. 通過波検定

(1) 通過波検定の概要

水理模型実験では、構造物設置位置やその周辺での入射波条件を調べるために、通過波検定を行った。通過波検定時には、図-4 に示すように、実験対象とした海底地形だけで、つまり構造物を設置しない状態で造波した。図中に示す 7 箇所まで水位を計測し、浅水変形の様子と、構造物設置位置付近における波浪特性の確認を行った。なお、図中の Ch.7 が構造物設置位置に相当する。

数値計算においても、越波の再現計算に先立って、水理実験と同様に、構造物を設置しない条件を対象

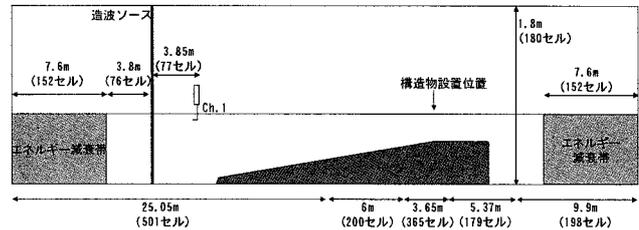


図-5 計算領域（通過波検定）

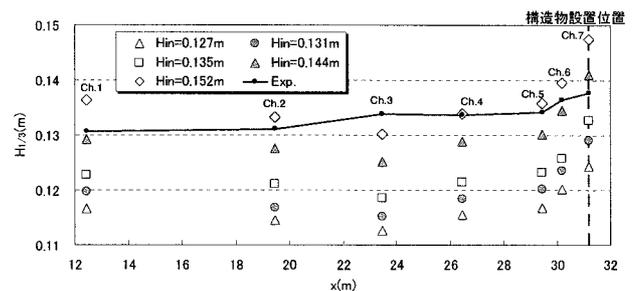


図-6 有義波高分布

とした波浪計算、つまり通過波検定を行い、入射波の伝播特性を確認するとともに、所定の波浪条件を与える入射波の入力条件を検討した。

(2) 通過波検定に基づく入力波高の設定

図-5 に通過波検定に用いた計算対象領域全体図を示す。計算には造波ソースを用いており、岸側と沖側の両境界にエネルギー減衰帯を配置するとともに、両境界を開境界に設定した。

図-6 にケース 1 ($H_{1/3}=13.1\text{cm}$) に対して、計算の入力波高値を 12.7cm から 15.2cm まで変化させた際の、有義波高の岸沖分布を実験値と合わせて示す。Ch.1 ($x=12.45\text{m}$) ~ Ch.3 ($x=23.45\text{m}$) では、波の伝播に伴って有義波高の計算値がわずかに減少するものの、Ch.3 より岸側で浅水変形による波高増大が生じる様子は、いずれの入力波高でも、実験結果と同様な傾向を示している。ただし、構造物設置位置付近の Ch.6 や Ch.7 における計算値は実験値と比べると急激に増加している。これは、この範囲が最大波高に近い波が碎波する領域であり、実験値、計算値ともにはばらつきが生じたためであると考えられる。本検討では、越波計算の精度向上のために、著者ら³⁾と同様に、表面セルの流速を CADMAS-SURF のデフォルト（外挿）とは異なり、勾配ゼロの条件で計算しており、碎波領域の計算精度が若干低下している可能性もある。これについては今後の課題である。

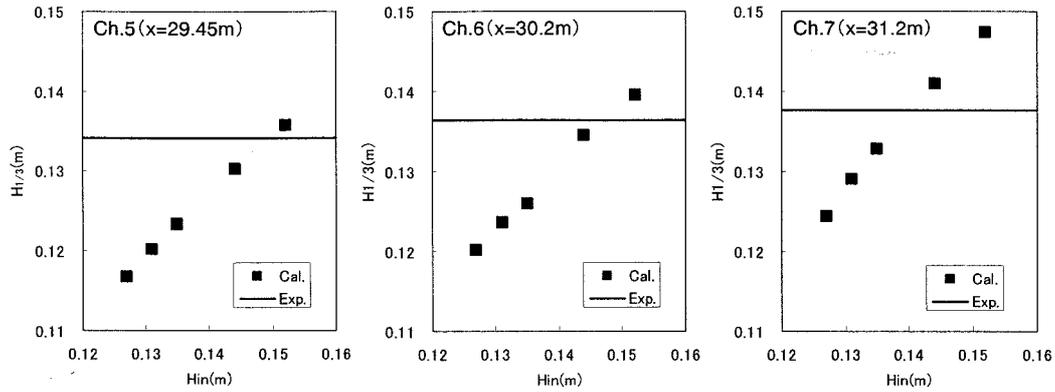


図-7 入力波高と Ch. 5～Ch. 7 における波高計算結果の関係

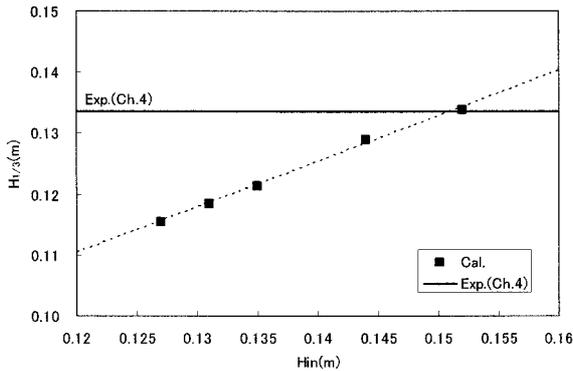
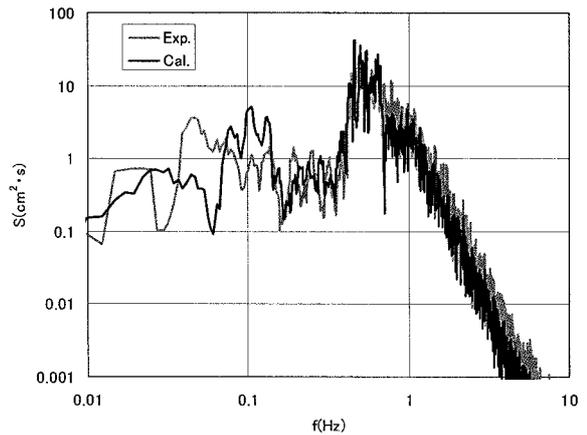


図-8 入力波高と Ch. 4 における波高計算結果の関係

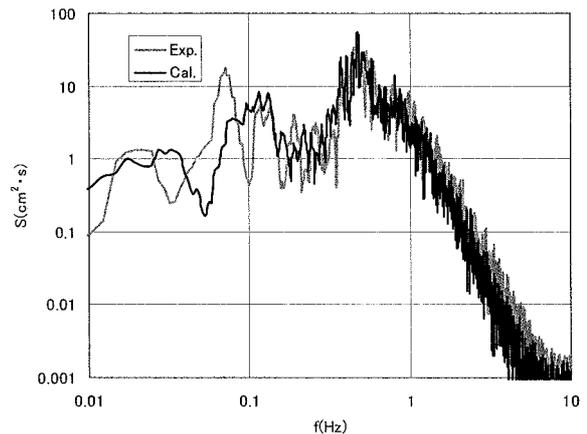
図-7 に、入力波高と Ch. 5～Ch. 7 における波高の関係を示す。図には、各地点における有義波高の実験値を実線で示している。各地点において入力波高と通過波高の関係を導くことは可能であるが、前述の通り、この範囲は碎波帯内であり、波高の計算値と実験値にばらつきが生じるため、ここでは沖側の非碎波領域である Ch. 4 で通過波検定を行った。

図-8 に、入力波高と Ch. 4 ($x=26.45\text{m}$) における波高との関係を示す。この図より、Ch. 4 における通過波の実験値と計算値の差が最小となる波高は $H_{1/3}=15.2\text{cm}$ であり、同値を入力波高として採用した。ケース 2 ($H_{1/3}=16.4\text{cm}$) に対しても同様の検討を行い、入力波高を $H_{1/3}=17.2\text{cm}$ とした。

図-9 に、両ケースに対する入力波高調整後の模型設置位置における周波数スペクトルを示す。計算値と実験値が概ね一致していることがわかる。なお、ここでは、特に周波数スペクトルの合わせ込みは行っていない。



(a) ケース 1



(b) ケース 2

図-9 護岸設置位置における周波数スペクトル

4. 低天端護岸に対する不規則波越波再現計算の概要

数値波動水路 CADMAS-SURF を用いて、越波排水路を有する低天端護岸の越波再現計算を実施した。計算領域の概要を図-10 に示す。格子間隔は鉛直方向

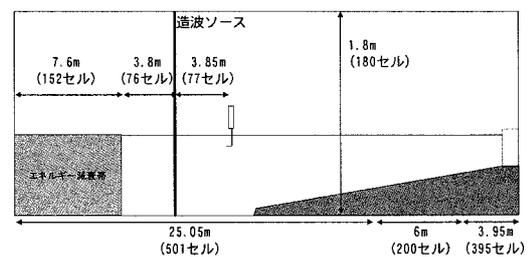


図-10 計算領域 (越波計算)

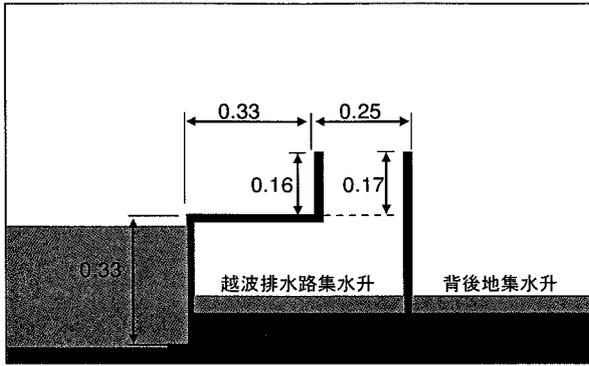


図-11 護岸周辺の計算条件

に 1cm, 水平方向に可変メッシュを用いて沖側から 5cm, 3cm, 1cm と変化させた. 特に護岸周辺の越波現象を高精度に解析するため, 護岸近傍の格子間隔は 1cm×1cm とした. 護岸周辺の計算領域を図-11 に示す. 実験と同様に, 2 つ集水升を岸沖方向に並列に設置した. 越波量は集水升内の VOF 関数 F 値により求めた. 表-2 に計算条件を示す.

5. 不規則波越波再現計算の結果

(1) 天端上の水塊の挙動

ケース 1 およびケース 2 の護岸天端上における水塊挙動の計算結果を, それぞれ図-12 および図-13 に示す. 両ケースとも, 護岸に乗り上げた水塊が天端上を岸向きに進行し, 越波排水路沖側の壁に衝突して上方に打ちあがり越波が生じている様子が認められる. 一方で, 壁を越えなかった水塊が戻り流れ

表-2 計算条件

有義波高	15.2cm	17.2cm
有義波周期	1.5s	1.7s
水深	70cm	
x 方向の格子幅 Δx	1~5cm (図-10参照)	
z 方向の格子幅 Δz	1cm (図-10参照)	
計算時間	450s	
ポアラス下限値	0.1	
造波モデル	造波ソース	
粘性	なし	
流速・圧力境界条件	スリップ	
VOF関数 F 境界条件	フリー	
計算スキーム	VP-DONOR 0.2	
気泡上昇速度	0.2m/s	
水滴落下速度	自由落下	

として天端から護岸前面に向かって落下しており, 対象護岸は低天端にも関わらず越波排水路の効果により, 越波を抑制することができている. ケース 1 と比較して波高・周期ともに大きいケース 2 では, 天端上に乗り上げた水塊が多量のため, 越波排水路の壁に衝突して打ち上がる規模も大きく, 排水路へも大きな水塊が流入・落下している. なお, 実験時の天端上の水塊の挙動については, ビデオ撮影および目視による観察を行っており, 実験でみられた水塊の挙動を計算により精度良く再現されていることを確認している.

(2) 越波流量の時系列

越波排水路 (Q1) および背後地 (Q2) に相当する集水升内の VOF 関数 F 値の総量から換算した単位幅当たりの越波量の時間変化を図-14 に示す. 両ケースとも, 作用する波数の増加とともに越波量が増加していることがわかる.

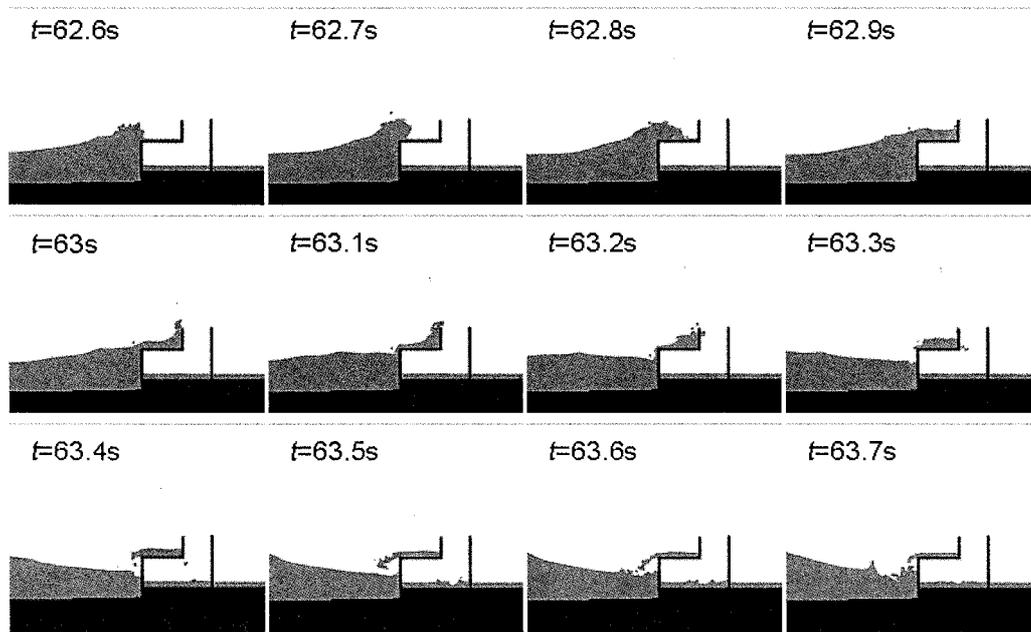


図-12 護岸天端上における水塊の挙動 (ケース 1)

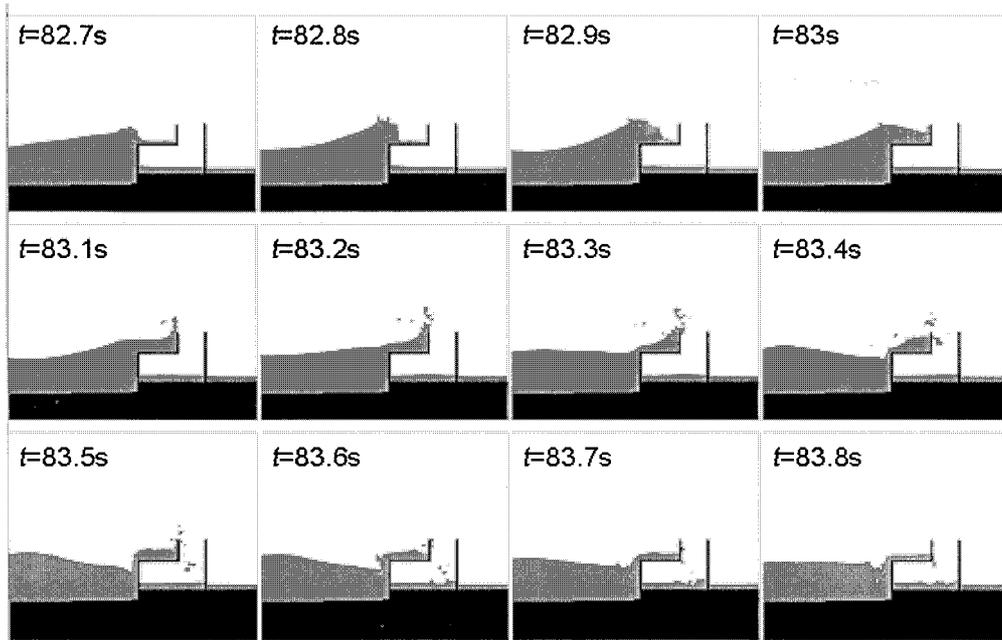
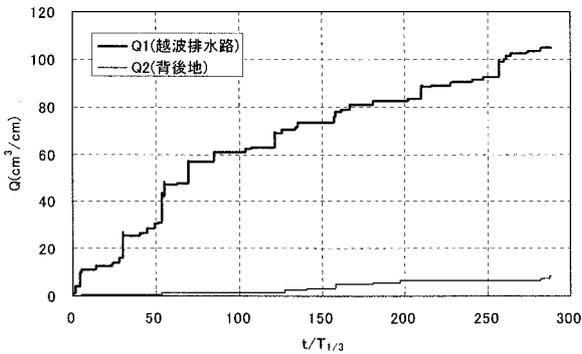
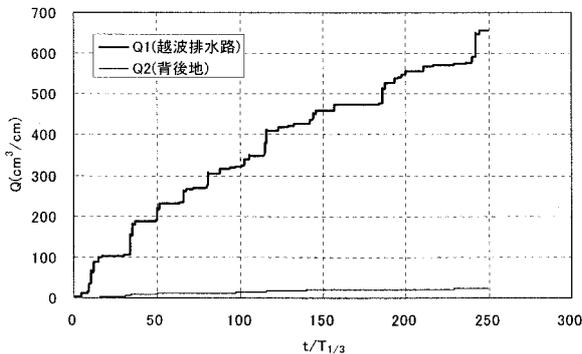


図-13 護岸天端上における水塊の挙動 (ケース 2)

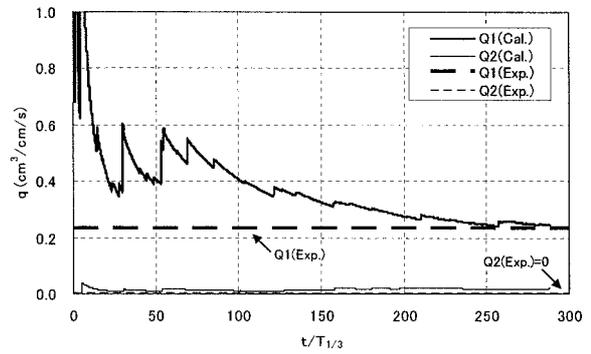


(a) ケース 1

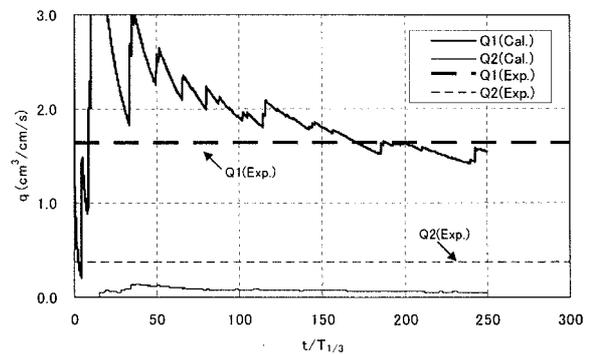


(b) ケース 2

図-14 越波量時系列の計算結果



(a) ケース 1



(b) ケース 2

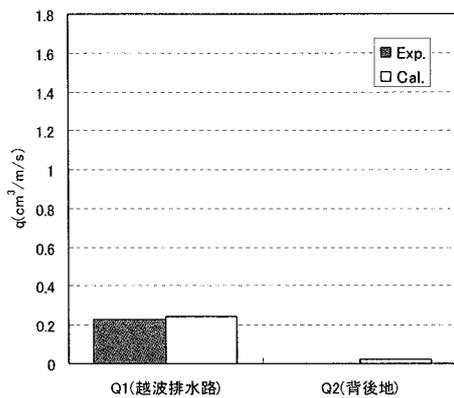
図-15 越波流量の計算結果と実験結果との比較

得られた越波量の時系列から算定した越波流量の時系列を図-15に示す。図中には、水理実験で得られた平均越波流量を破線で示している。越波排水路への越波流量の時系列は、波数が少ない間は変動が大きいが、 $t/T_{1/3}=100\sim 200$ 以降で安定しており、最終的に越波流量の計算値は概ね実験値に近い値となっている。これは、越波流量は越波開始からの経

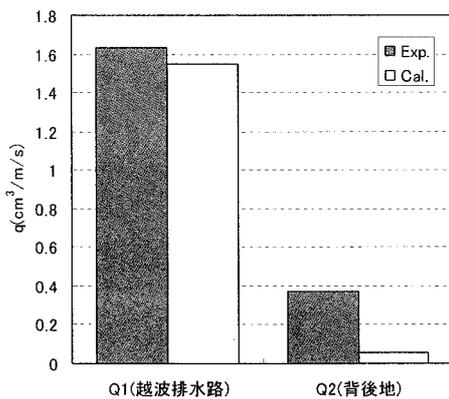
過時間と集水升内の水量の初期値からの増分により計算されることから、波数が少ない間は1波毎の越波量の影響が顕著に表れるのに対して、時間の経過とともに入射波特性に応じた平均的な値に漸近していくためである。これは、不規則波を対象とした越波の水理実験においても100~200波を連続して作用させる必要があることと一致している。

(3) 平均越波流量

計算と実験の終了時点の越波量から算定した平均越波流量の比較を図-16 に示す。越波排水路への越波流量 (Q1) に関しては、両ケースとも計算値は実験値を良好に再現している。一方で、背後地への越波流量に関しては、ケース 2 の実験結果が越波排水路への越波流量の 1/4 程度が背後地へ到達しているのに対して、計算結果は背後地への流入量を過小評価している。波高が大きな条件において背後地への越波流量の計算精度が不十分となるのは、著者ら³⁾が行った規則波計算でもみられた傾向である。この理由として、CADMAS-SURF が単相流モデルであるため、水塊と越波排水路の壁面の間に閉じ込められる空気塊の圧力上昇を考慮できず打ち上げ高に差が生じることや、空気が大量に混入した状態の微細な飛沫の表現が不十分であることなどが原因であると考えられる。これについては今後の検討課題としたい。



(a) ケース 1



(b) ケース 2

図-16 平均越波流量の実験値と計算値の比較

6. 結論

本研究では、数値波動水路 CADMAS-SURF を用いた数値計算と水理実験により、天端上に越波排水路を

有する低天端護岸周辺の不規則波越波現象について検討を行った。得られた主な結論を以下に示す。

- 1) 通過波検定に基づく入力波高の調整により、数値波動水路 CADMAS-SURF は期待通りの不規則波を造波できることが確認された。
- 2) 越波流量の計算値と実験値を比較した結果、飛沫として飛散する越波形態の再現性に問題が残るものの、CADMAS-SURF は越波排水路を有する低天端護岸の不規則波越波現象を良好に再現できており、その有効性が実証された。
- 3) CADMAS-SURF を用いて不規則波の平均越波流量を算定する際には、水理模型実験と同様、100~200 波以上作用させると、安定した値が得られることを明示した。

謝辞：本研究は、数値波動水槽の耐波設計への適用に関する研究会（委員長：東京大学・磯部雅彦教授）および同研究会内の越波ワーキンググループ（幹事：名古屋大学・川崎浩司准教授）における研究成果であることを付記し、関係各位に感謝の意を表す。また、水理実験にあたっては、(株)日本工業試験所・新幸弘行氏の協力を得たことを記して、謝意を表す。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 筒井勝治, 北野正夫, 八木典昭, 目見田哲, 殿最浩司: 上部スリット式護岸の越波および反射特性について, 海洋開発論文集, Vol. 13, pp. 615-619, 1997.
- 3) 有光 剛, 安岡恒人, 川崎浩司: 越波排水路を有する低天端護岸における越波現象に対する数値波動水路の適用性, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp. 726-730, 2007.
- 4) 榊山 勉: 消波護岸の越波に関する数値計算モデルの開発と検証, 電力中央研究所報告, 研究報告: U97103, 27p, 1998.
- 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) 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.
- 7) 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.
- 8) (財) 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, 457p, 2001.