

波の遡上に対するCADMAS-SURFの適用性の検証

AN INVESTIGATION FOR APPLICABILITY OF WAVE RUN-UP
BY CADMAS-SURF

桜庭雅明¹・榊山 勉²・有川太郎³・井上温人⁴・中平順一⁵・和田匡央⁶
Masaaki SAKURABA, Tsutomu SAKAKIYAMA, Taro ARIKAWA, Atsuhito INOUE
Junichi NAKAHIRA and Masao WADA

¹正会員 博(工) 日本工営(株) 中央研究所(〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原2304)

²正会員 博(工) (財) 電力中央研究所(〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

³正会員 博(工) (独) 港湾空港技術研究所(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

⁴工修 (株) ニュージェック 港湾・海岸グループ(〒135-0007 東京都江東区新大橋1-12-13)

⁵正会員 八千代エンジニアリング(株) 臨海開発部(〒161-8575 東京都新宿区西落合2-18-12)

⁶ (財) 沿岸技術研究センター(〒102-0092 東京都千代田区隼町3-16 住友半蔵門ビル6F)

CADMAS-SURF is a useful numerical model to design maritime structure. Applicability of CADMAS-SURF for predictions of breaking waves or irregular waves has been studied. However, there are not many studies about the wave run-up problems. It is necessary to investigate the applicability of CADMAS-SURF for predictions of wave run-up.

This paper presents an investigation for applicability of CADMAS-SURF for predictions of wave run-up. In order to verify the accuracy of CADMAS-SURF, CADMAS-SURF was applied to several wave run-up conditions. The computational results are compared with the experimental results to show the validity and efficiency of CADMAS-SURF. In order to compare the numerical results using different mesh size, several numerical studies were carried out. The present study proposed the calculation conditions for numerical simulation.

Key Words : *Design of maritime structure, wave run-up, breaking waves, mesh size, CADMAS-SURF*

1. はじめに

CADMAS-SURF は様々な海域施設の耐波設計に適用され、その有用性が報告されている^{1),2)}。また、CADMAS-SURF の有用性を検証するために波の諸現象に関する計算精度および適用限界等についても報告されている。例えば、有川ら³⁾による砕波変形に関する計算の高精度化に関する研究や、佐貫ら⁴⁾による越波量に関する検証が挙げられる。不規則波への適用については藤原⁵⁾によって不規則波の造波方法および伝播特性についてその精度および適用限界について示されている。更に、川崎ら⁶⁾、大熊ら⁷⁾および鈴木ら⁸⁾はCADMAS-SURFを実用的な問題に適用し、その有用性を示している。

一方、波の遡上に関するCADMAS-SURFの精度検証に関する報告としては、藤原ら⁹⁾や松村ら¹⁰⁾の研究が挙げられる。しかし、これらの研究では各種の波浪条件における計算精度および適切な格子幅等を含めた計算条件における適用限界については検証されていない。

本研究では、任意の勾配を有する斜面に対する規則波の遡上をCADMAS-SURFによって計算を行い、

波浪条件や計算格子幅の違いによる計算精度について検証することを目的とするものである。計算精度の検証にあたっては、中村らの複合斜面の波の打ち上げ高の実験結果¹¹⁾と比較して波形勾配の違いによる遡上の計算結果に関する考察を行った。また、任意斜面での砕波減衰に伴う遡上高の計算結果について考察し、砕波や波形勾配の影響に伴う数値的な減衰および遡上波への影響について検討を行った。更に、格子間隔の違いによる遡上高の計算結果の変化について検討を行い、遡上高を適切に評価するための格子サイズについて評価を行った。

2. 既往の水理模型実験の概要

本研究では、CADMAS-SURFにおける波の遡上の計算精度を検証するにあたり、中村らの既往実験の結果を用いて比較を行った。実験断面は、図-1に示すとおりであり、①～⑦は模型実験によるもの、⑧は愛媛県長浜海岸にて実験堤を設けて現地で波の観測と同時に波の打ち上げ高を測定したものである。実験における波高は最大20cm、波の周期は1.0～

2.5s となっている。また、現地における波の観測は、水深 12m の位置で水位変動を測定し、岸に達するまでの波を追跡して、打ち上げ高を測定している。そのときの波高は 1.0~2.0m のものを採用している。また、周期は 7~8s 程度となっている。実験結果は、波の打ち上げ高の無次元量と各諸量の関係式である次式を用いて整理されている。

$$R/H_0 = f(H_0/L_0, h_d/H_0, \cot \alpha) \quad (1)$$

ここに、 R は静水面からの波の打ち上げ高さ、 H_0 は沖波波高、 L_0 は沖波の波長、 h_d は堤脚水深、 α は斜面と水平のなす角度である。 $\cot \alpha$ は図-2 に示すように斜線部分の面積と等しくなるような $R+h_b$

(打ち上げ高さ+砕波水深) を高さとする仮想三角形を考えるものとして、この時の三角形の斜辺の勾配を仮想勾配(改良仮想勾配)としている。仮想勾配は次式のように表すことができる。

$$\cot \alpha = \frac{2A}{(h_b + R)^2} \quad (2)$$

ここに、 A は仮想勾配となる部分の面積、 h_b は砕波水深、 R は静水面からの打ち上げ高までの鉛直高である。

実験結果は波形勾配(H_0/L_0)、仮想勾配($\cot \alpha$)と打ち上げ高さ(R/H_0)の関係として整理されている。本研究では、実験により得られている仮想勾配と打ち上げ高さの関係との比較を行うものとした。

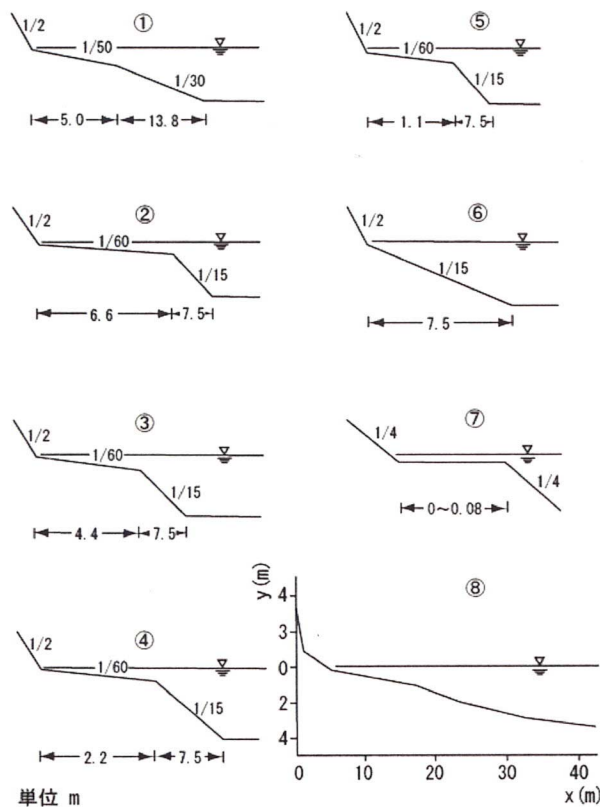


図-1 中村ら¹¹⁾の実験に用いられた海浜断面
(文献 11) の図を一部修正)

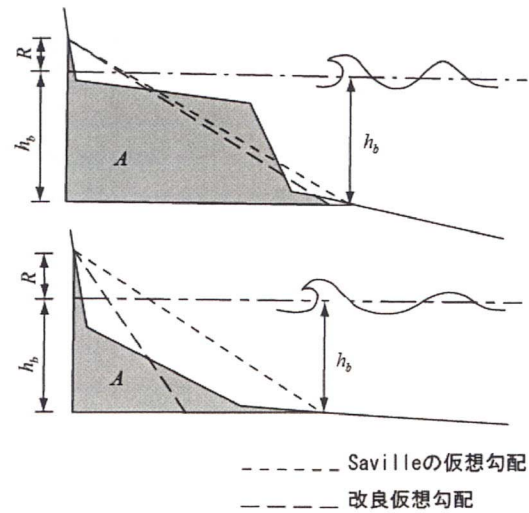


図-2 遡上高と改良仮想勾配の定義

3. 計算方法

(1) 検討ケース

本研究で対象とした検討ケースを表-1に示す。波浪条件は、既往の実験¹¹⁾に用いられた波形勾配の条件(波形勾配0.02~0.06程度)に近くなるように設定した。格子サイズについては後述の検討結果により適切とされる格子サイズとして、水平方向2.5cm、鉛直方向1cmを基本とした。なお、本検討の波浪条件は全て規則波を対象とした。

表-1 検討ケース

Run	H_0 (m)	T (s)	L_0 (m)	H_0/L_0	$\Delta x/L_0$	$\Delta z/H$
1	0.20	2.50	9.75	0.0205	1/390	1/20
2	0.25	2.50	9.75	0.0256	1/390	1/25
3	0.30	2.50	9.75	0.0308	1/390	1/30
4	0.35	2.00	6.24	0.0561	1/250	1/35
5	0.35	3.00	14.04	0.0249	1/562	1/35
6	0.40	2.50	9.75	0.0410	1/390	1/40
7	0.40	3.50	19.11	0.0209	1/764	1/40

(2) 計算断面

計算に用いた海浜断面は図-3に示すとおりである。1/15と1/60の勾配を有する断面(ケース1)と1/15の一樣勾配の断面(ケース2)を対象とした。なお、両ケースとも陸域での勾配は1/2とした。本研究で用いた海浜断面は、ケース1は中村らの実験の②の断面、ケース2は⑥の断面に該当する。

遡上高の算定にあたっては、図に示す勾配1/2の箇所に対して0.2m間隔で計算水位を確認し、水位変化を検知した箇所における水位を遡上高として定義した。

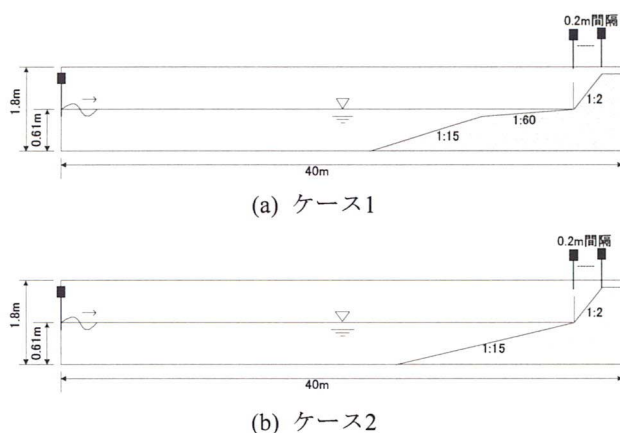


図-3 計算断面（上図：断面1，下図：断面2）

(3) 計算パラメータ

計算のパラメータは表-2 に示すとおりである。計算時間は40s までとしているが、これは遡上高を計測するにあたり、反射等の影響が含まれない有効な時間として設定したものであり、この時間内での遡上波は10 波前後である。

表-2 パラメータの設定値

計算条件	設定値
バージョン	CADMAS-SURF Ver. 5.0
時間制御	時間刻み幅初期値：0.001s
	時間刻み幅の安全率：0.30
	時間刻み幅の最小値： 5×10^{-5} s
	時間刻み幅の最大値：0.1s
	計算時間：40s まで
造波条件	造波境界
	造波関数：ストークス波またはクノイド波
境界条件	流速・圧力：スリップ境界条件
	VOF関数：フリー
水路諸元	水路延長：40m（造波境界）
	水路高さ：1.8m
その他	ボラス値の下限：0.1
	差分スキーム：VP-DONOR 0.5
	TimerDoor法による気泡上昇速度：0.2m/s
	TimerDoor法による水滴の自由落下・斜面上処理

4. 計算結果

(1) 遡上波の時系列

図-4 にRun1 の条件における海浜断面のケース1 およびケース2 における遡上高の時系列を示す。ここでいう遡上高は、海浜断面の勾配が1/2 に変化する箇所における水位変化として定義した。ケース1 の断面は1/60 の勾配を有しているのに対し、ケース2 の断面は1/15 の一様勾配となっており、この影響により碎波後の水位変化の形態が異なる。このため、ケース1 における水位変化は、碎波後の海底勾配が緩くなる影響により、一旦遡上した後に水位上昇が保たれる状態となる。ケース2 の断面では勾配1/15

の斜面からの遡上となるため、遡上高の水位変動がケース1 より大きくなる。

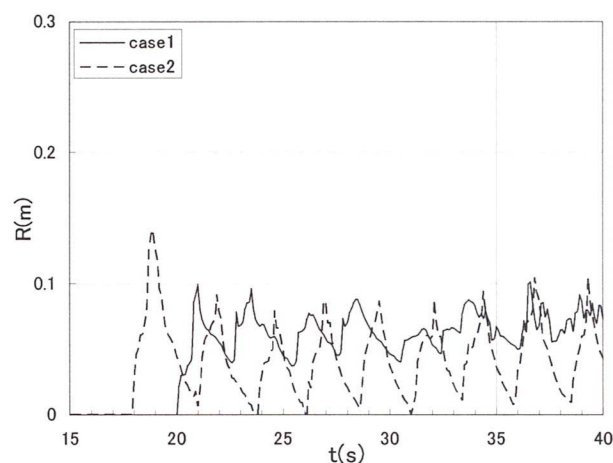


図-4 遡上高の時系列（Run1）

(2) 実験結果との比較

次に、中村ら¹¹⁾の波の打ち上げ高の実験との比較を行った。それぞれの検討ケースRun1～Run7 における遡上高の計算結果と中村らの実験結果の比較を図-5 に示す。横軸は改良仮想勾配 $\cot \alpha$ （式(2)）であり、縦軸は入射波高を用いて無次元化された遡上高 R/H_0 である。無次元の打ち上げ高さについては、計算された遡上高の時系列から最大、平均、最小値について算定してプロットした。また、図中の黒丸のプロットは中村らの実験結果である。中村らの実験結果は合計8 断面の複数の波浪条件により得られた遡上高であるため、幅広い改良仮想勾配の範囲により実験結果が記載されている。波形勾配に関する近似曲線は、中村らが実験結果より作成した各波形勾配に対応する曲線である。

計算結果は波浪条件により若干異なるが、ケース1 の断面に比べて、ケース2 の結果が全体的に大きな値となる。これは、ケース2 の勾配が1/15 の一様斜面であることから、比較的岸側で碎波して遡上するため、減衰距離がケース1 に比べて少ない状態で遡上することが原因として考えられる。ケース1 の場合は、1/60 の斜面が岸側に含まれるためケース2 に比べて沖合で碎波が生じ、碎波後の岸沖距離が長いために、碎波後の減衰が大きくなるものと考えられる。更に波形勾配の違いにより比較すると、波形勾配が0.02～0.03 程度（Run1, 2, 3, 5, 7）は実験結果と同等の傾向を示している。この結果に対して、波形勾配が0.04 以上（Run4, 6）は実験結果より過小の傾向となる。この理由として、波形勾配が大きな場合は碎波前後の数値減衰が影響して、遡上高が過小となることが考えられる。

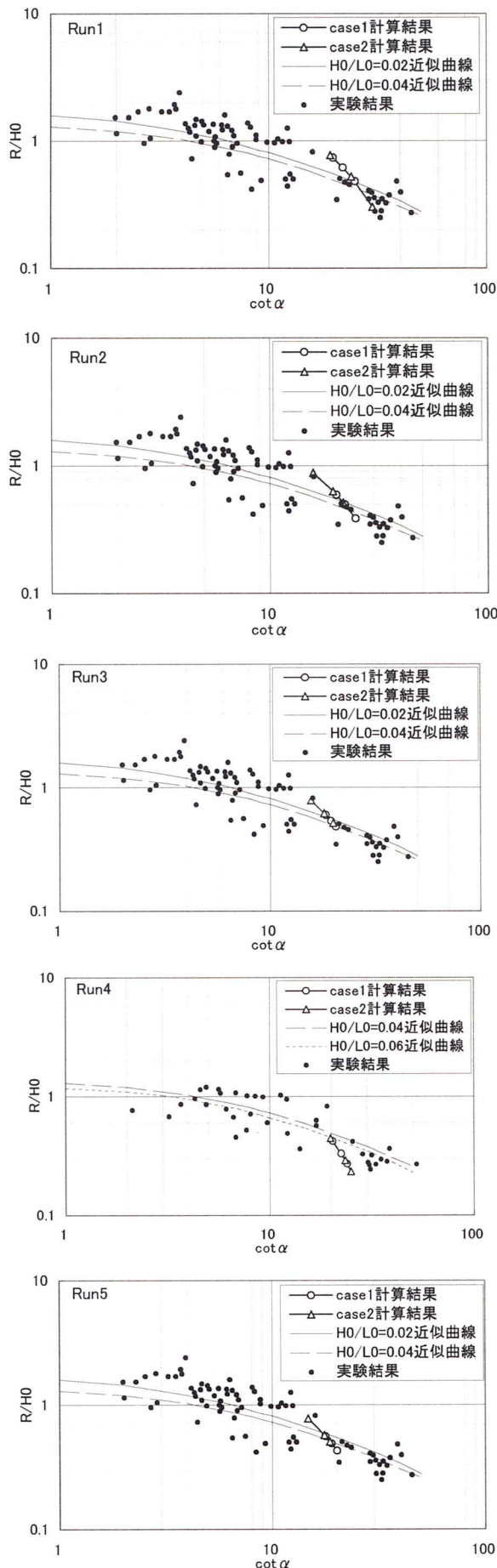


図-5 遡上高の実験結果との比較 (Run1~5)

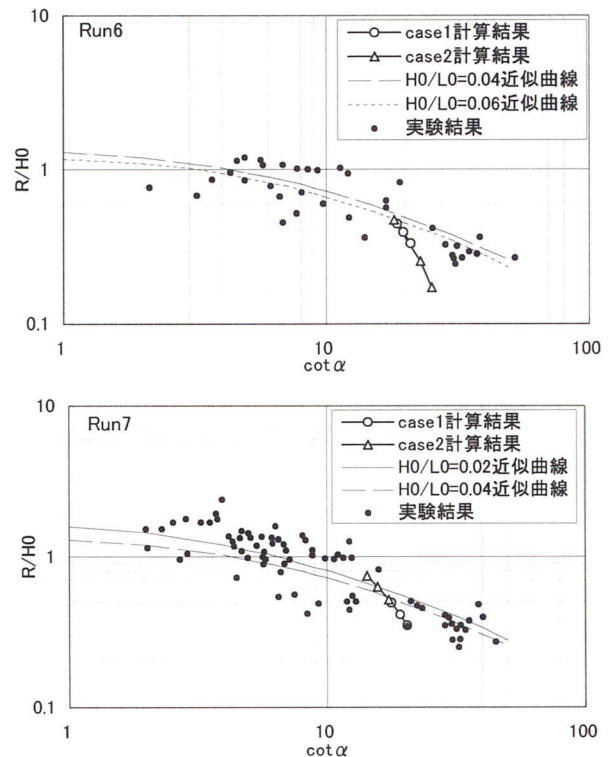


図-5 遡上高の実験結果との比較 (Run6~7)

(3) 碎波減衰の影響

前述の計算結果から入射波の波形勾配が大きなケースでは、遡上高が中村らの実験結果より過小評価になることが確認された。この原因は碎波前後の数値減衰による波浪減衰の影響であることが考えられる。

遡上前の碎波減衰過程の影響を確認するために、図-3のケース1の条件における碎波波高および碎波水深の計算結果を合田の碎波指標¹²⁾と比較した。各碎波指標と本研究で実施した計算結果との比較を図-6~図-8に示す。図-6は碎波水深における指標との比較になるが、ケース1の碎波点となる海底勾配は1/15であり、碎波指標と同等の傾向になる。但し、碎波波高(図-7, 図-8)に関連する比較では、波形勾配または波高が大きくなるにつれて碎波波高が過小評価となる。この結果より、碎波前後に数値減衰が生じる可能性が高いことが示される。波高が0.35mを越えるケース(Run4~7)では、碎波前後の計算の結果がそのまま影響して、遡上高も碎波前後の数値減衰の影響により全体的に過小評価になっている可能性が高い。

波形勾配または波高が大きなケースで碎波波高が全体的に小さくなる理由については、格子サイズ(格子幅波高比)の影響やCADMAS-SURFの計算条件(気泡や水滴等の計算処理の方法および碎波時における表面セルの流速の処理条件等)が考えられるが、この原因については更に今後検討が必要である。

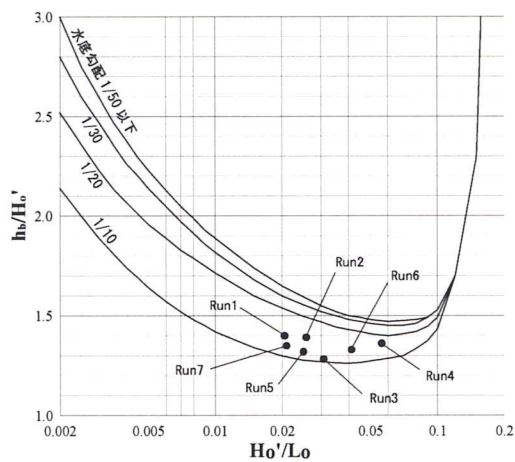


図-6 碎波指標との比較（碎波水深）

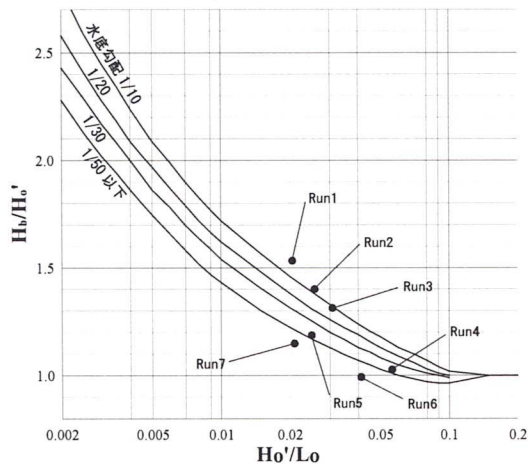


図-7 碎波指標との比較（碎波波高）

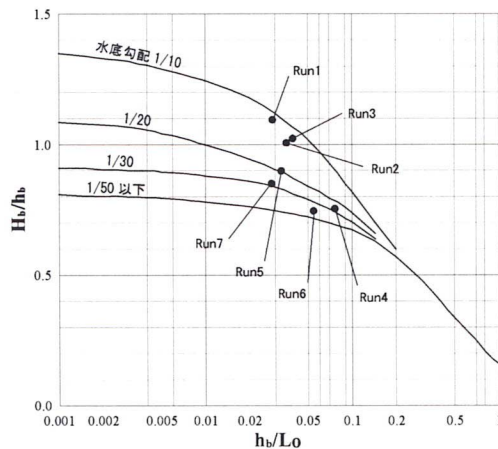


図-8 碎波指標との比較（碎波波高・水深比）

(4) 格子サイズの影響

次に、計算に用いる計算格子の間隔が波の遡上
の結果にどの程度影響をするかを確認した。断面ケ
ース1に対して波形勾配の小さいRun1およびRun2と波
形勾配の大きいRun4およびRun6を対象として、計算
格子間隔を上述の検討に用いた計算格子の間隔（水
平2.5cm、鉛直1.0cm）を基準に水平・鉛直格子を2
倍および水平・鉛直のいずれかを2倍にした場合の
計算結果の比較を行った。図-9に断面ケース1の
Run1, Run2, Run4およびRun6の場合における遡上高の

時系列を示す。水平・鉛直方向とも格子サイズが大
きいケース（水平5cm、鉛直2cm）の場合は波形勾配
に関係なく、全体的に遡上高は過小評価となる。鉛
直方向の格子のみを1cmと小さくしている場合は、
時系列は格子サイズが小さいケース（水平2.5cm、鉛
直1cm）と同等の傾向を示す。なお、鉛直方向のみ
を2cmと大きくした場合については波形勾配が小さ
なケース（Run1およびRun2）では、時刻45s程度から
急激に水位が上昇する。しかしながら、波形勾配が
大きなケース（Run4およびRun6）は特にその傾向は
見られないが全体的に時系列の後半で過小評価と
なっている。これは、入射波高が小さいケースに対
して格子の縦横比が計算精度に影響を及ぼすこと
が示されている結果である。この原因として考えら
れるのはRun1およびRun2の場合は、入射波高が小
さいのに対して鉛直方向の格子幅が大きくなること
が原因として考えられる。また、水平格子のみを細
かくしても遡上箇所付近の水位変化を適切に表現
できないことが理由として考えられる。

これらの計算結果より、CADMAS-SURFにより遡上
計算を実施するにあたっては、遡上する箇所の付近
では、表-1に示す程度の格子間隔（水平格子幅波長
比1/250以下、鉛直格子幅波高比1/25以下程度）が
必要になると考えられる。また、格子幅だけでなく、
格子の縦横比も計算結果に影響することが確認でき
た。

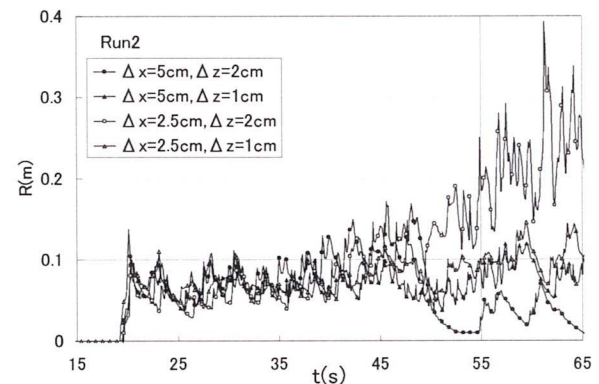
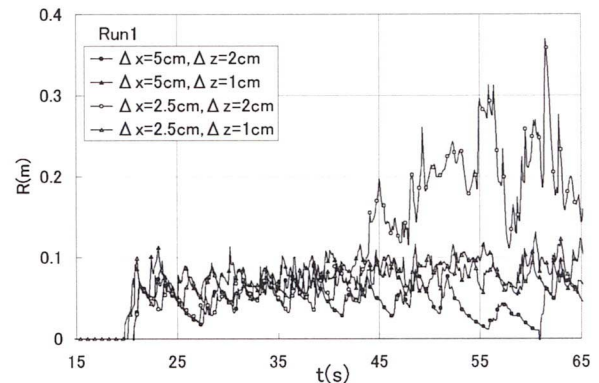


図-9 格子間隔の違いによる比較 (Run1, Run2)

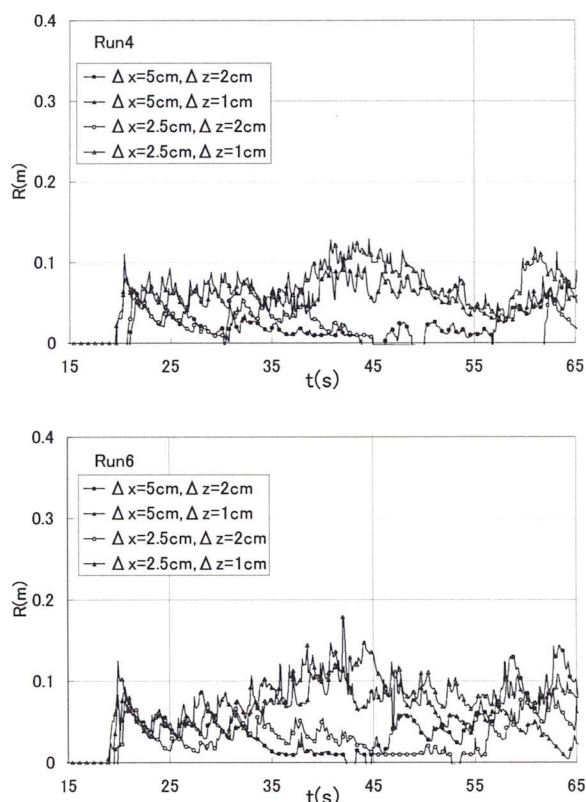


図-9 格子間隔の違いによる比較 (Run4, Run6)

4. おわりに

本研究では、任意の勾配を有する斜面に対する規則波の遡上を CADMAS-SURF によって計算を行い、海浜断面、波浪条件および計算格子幅の違いによる計算精度の検証を行った。その結果、以下の結論が得られた。

- CADMAS-SURFで計算した波の遡上の計算結果は、既往の実験結果と同等の傾向を示した。
- 波形勾配の大きなケースに対しては、遡上高を若干過小に評価する傾向となった。これは碎波指標と計算結果を比較したところ、碎波前後の数値減衰が影響しているものと考えられる。この対策としては、格子幅波高比を更に小さくすることや、CADMAS-SURFの計算条件（気泡や水滴等の計算処理の方法および碎波時における表面セルの流速の処理条件等）の変更等が考えられる。
- 計算格子幅の違いによる計算結果の違いの検討を行った結果、格子サイズだけでなく格子縦横比の違いにより結果が変化することが確認できた。

今後の課題としては、更に計算条件の違いによる遡上高の影響検討、断面2次元の不規則波における遡上の計算精度の検証や3次元計算における遡上の計算精度の検証が挙げられる。

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（事務局・（財）沿岸技術研究センター）において行われた波の伝播 WG で行われた作業内容をまとめたことを記し、関係各位の皆様にはこの場を借りて謝意を表します。

参考文献

- 1) 磯部雅彦, 高橋重雄, 余錫平, 榊山勉・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.
- 2) (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.
- 3) 有川太郎, 山野貴司, 秋山実: 数値波動水槽における碎波変形計算の高精度化, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.71-75, 2007.
- 4) 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.
- 5) 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および適用限界に関する一考察, 海岸工学論文集, Vol.52, pp.41-45, 2005.
- 6) 川崎浩司, 富田孝史, 下迫健一郎, 高野忠史, 熱田浩史: ラップゲート型高潮防潮堤の越波と作用波力, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.791-795, 2003.
- 7) 大熊義夫, 興野俊也, 柴崎尚史, 安田勝則, 中野修: 流速場における混成堤断面の被災状況の相違によるブロック安定性検討, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.751-755, 2003.
- 8) 鈴木高二朗, 大寄菜々子, 山本泰司: 防波堤基礎での洗掘量の推定について, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.886-890, 2003.
- 9) 藤原隆一, 山崎智弘, 橘川正男, 早瀬松一: 複合断面の波の遡上に対する VOF 法の適用性と不規則波モデルへの拡張, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp.136-140, 2002.
- 10) 松村章子, 小竹康夫, 西克了, 榎木亨, 藤原隆一: 複合断面護岸遡上波への数値波動水路の適用性に関する検討, 土木学会第 55 回年次学術講演会概要集, 第 II 部門, pp.7-8, 2000.
- 11) 中村充, 大西亮一, 佐々木康雄: 複合斜面における波の打ち上げ高について, 農業土木試験場報告 第 11 号, pp.1-10, 1973.
- 12) 合田良実: 碎波指標の整理について, 土木学会論文報告集, No.180, pp.39-49, 1970.