

不規則波による越波を対象とした数値波動水路の適用性に関する研究

Study on Applicability of a Numerical Wave Flume for Overtopping by Irregular Waves

本田隆英¹・伊藤一教¹

Takahide HONDA and Kazunori ITO

CADMAS-SURF is a useful tool to evaluate wave actions for coastal structures. However, there are few studies concerning irregular waves by using CADMAS-SURF. The aim of this paper is to examine the applicability of CADMAS-SURF for the wave overtopping rate caused by irregular waves. The wave overtopping rate was calculated for uniform and sloped bottom conditions by using CADMAS-SURF. The calculated wave overtopping rate was compared with existing formulae. It is shown that CADMAS-SURF is capable of estimating the wave overtopping rate by irregular waves under broad condition with almost the same accuracy of existing formulae. It is also possible to determine the short-term overtopping rate caused by wave irregularity.

1. はじめに

護岸などの海岸構造物の設計では、越波に対する検討が必要となる。井上ら(1989)は、不規則波による越波実験を系統的に実施し、最大越波流量は平均越波流量の3～5倍、条件によっては20倍にも達することを報告している。これより、越波検討に波浪の不規則性を考慮する必要があるといえ、すでに関本ら(1992)や北野ら(2001)などは平均越波流量だけでなく短時間越波流量を考慮して護岸の越波検討を実施している。

波動場の数値解析を行うツールに、VOF法に基づく磯部ら(1999)による数値波動水路(CADMAS-SURF)が挙げられ、その詳細は(財)沿岸開発技術センター(2001)にまとめられている。CADMAS-SURFの特徴のひとつに、構造物や地形の形状がやや複雑な条件においても、波浪変形、越波量、波圧などを良好に算出できることが挙げられる。そのため、CADMAS-SURFは実務検討にも活用されている。CADMAS-SURFを用いた越波に関する研究例はこれまでにいくつか報告されているが、特に不規則波を扱ったものに中野ら(2001, 2002)、藤原(2005)が挙げられる。ただし、これらの研究例では計算ケースが限定されているうえ、これまでに公開されているCADMAS-SURF(V4.0以前)では、不規則波の計算を行う際に水路内の水量が保存されないといった問題点があった。このたび公開されたCADMAS-SURF(V5.1)では水量保存の問題が改善された。

そこで、ここでは不規則波による越波に対して数値波動水路の適用性を比較的広範な条件で検討することを目的とした。水平床および一様勾配斜面上の不透過直立堤を対象に、CADMAS-SURF(V5.1)を用いて不規則波による越波流量を算出し、国内外の複数の既存越波流量算定式との比較検討を行った。さらに、CADMAS-SURF

は水位の時間変動を連続的に算出できることから、不規則波による越波量の確率特性についても検討を行った。

2. 水平床上における越波

(1) 計算条件

まず最も簡単な条件として、図-1に示す二次元水路を対象に、水平床上における不透過直立堤の越波流量を算出した。水深を14.0mの一定とし、造波ソースから有義波高3.0m、有義波周期11.0s(沖波有義波長188m、沖波波形勾配0.016)の修正プレトシュナイダー・光易スペクトルの不規則波を入射させ、直立堤の天端高 h_r を0.4mから3.6mまで0.4mごとに変化させて直立堤の越波流量を算出した。造波ソースから直立堤までの距離は2波長とし、造波時間は有義波で200波相当の2,200sとした。沖側境界は透過境界とし、2波長分の減衰帯を配置した。岸側には水深2.0mの越波升を1波長分配置した。計算格子は水平方向2.0m(波長188mの1/94)、鉛直方向0.4m(有義波高3mの1/7.5)の等間隔格子とした。CADMAS-SURFに入力するその他の解析パラメータは、表-1に示すとおりで、ほぼデフォルト値とした。

(2) 通過波検定

越波計算を実施する前に、直立堤を設置しない状態で通過波検定を実施した。直立堤位置におけるスペクトル分布は入射波に用いた修正プレトシュナイダー・光易スペクトルとほぼ合致しており、同位置で目標とする不規則

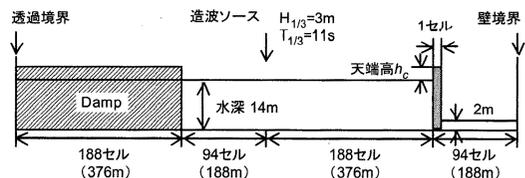


図-1 計算対象水路(水平床)

表-1 解析パラメタ条件

時間刻み	Auto (安全率:0.2)
差分スキーム	DONOR-0.2
粘性	なし
流速・圧力境界条件	SLIP
VOF 関数 F の境界条件	FREE
気泡上昇速度	0.2 m/s
水滴落下速度	FREE - RUNDOWN
水量補正	3 周期ごとに補正

則波が十分に再現されていることを確認した。なお、通過波検定でスペクトルから算出した有義波高は、直立堤位置で2.88 mであった。

(3) 時系列越波量

直立堤の天端高が $h_c = 1.6$ m および $h_c = 3.2$ m の2ケースについて、累積越波量の時系列結果を図-2 に示す。同図より、越波量が比較的大きな $h_c = 1.6$ m のケースでは、連続的に越波が発生しており、越波量はほぼ一定の割合で増加している。一方、越波量が比較的小さな $h_c = 3.2$ m のケースでは、断続的に越波が発生し、累積越波量は個別波の越波の程度に大きく影響される様子が良好に再現されている。

(4) 越波流量の比較

越波流量と天端高の関係を、EurOtop (Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual, 2007) による越波流量算定式とあわせて図-3 に示す。越波流量の算定に用いる越波継続時間の影響を確認するため、図-2 (a) に示す100波および194波の4ケースの越波継続時間に対してそれぞれ越波流量を算出した。なお、EurOtop による非衝撃波条件の越波流量算定式は、次式のとおりである。

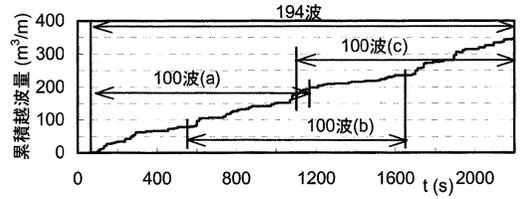
$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.04 \exp\left(-2.6 \frac{h_c}{H_{m0}}\right) \quad (1)$$

for $(0.1 < h_c/H_{m0} < 3.5)$

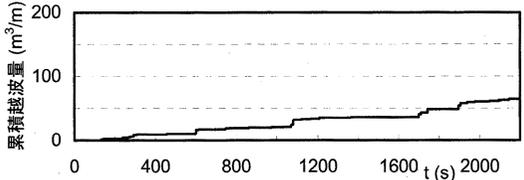
ここで、 q : 平均越波流量、 H_{m0} : 堤脚位置の有義波高、 g : 重力加速度である。 H_{m0} には通過波検定における直立堤位置の有義波高2.88 m を与えた。

図-3 より、CADMAS-SURF による計算結果は、天端高の増大ともなって越波流量が減少する様子を良好に再現しており、既存算定式ともよく一致している。ただし、天端高が大きくなると越波頻度および1波あたりの越波量が減少するため、100波平均による越波流量のばらつきが大きくなる。このような場合には計算時間を大きく設定するなどの注意が必要となる。

越波流量の算定精度を確認するため、CADMAS-SURF と既存算定式による越波流量の比を図-4 に示す。CADMAS-SURF により算出した越波流量は、既存算定式に対しておおむね0.9~1.1倍の範囲に収まっているこ



(a) 天端高: $h_c = 1.6$ m



(b) 天端高: $h_c = 3.2$ m

図-2 越波量の時系列結果

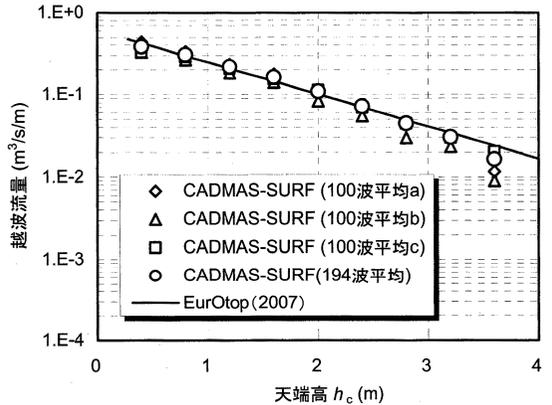


図-3 天端高に対する越波流量

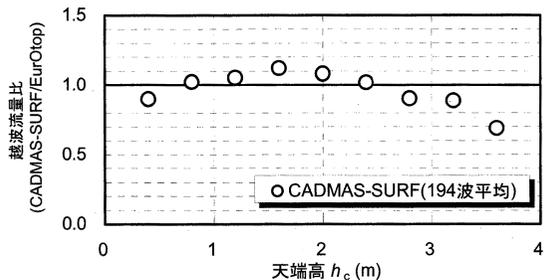


図-4 越波流量の算定精度

とが確認された。

以上から、水平床の簡単な条件で CADMAS-SURF により不規則波による越波流量を高い精度で算出できることが確認された。

3. 一様勾配斜面上における越波

(1) 計算条件

次に、図-5に示す一様勾配斜面に直立堤を設置した水路に対して越波計算を実施した。計算ケースは、合田ら(1975)によって提案された越波流量算定図表の実験ケースにならない、極力広範な条件で結果が得られるよう表-2のように設定した。斜面勾配は1/10, 1/30の2種類、

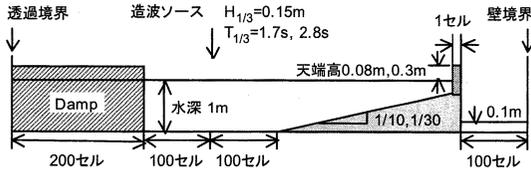


図-5 計算対象水路(一様勾配斜面)

入射波の有義波周期は1.7s, 2.8sの2種類、直立堤設置水深は0.450m, 0.225m, 0.075mの3種類、直立堤天端高は0.08m, 0.30mの2種類を設定し、これらを組み合わせた全24ケースに対して、有義波高0.15mの修正プレトシュナイダー・光易スペクトルの不規則波を有義波で250波相当を入射させ、越波計算を行った。計算格子は等間隔格子とし、格子間隔を入射波条件とあわせて表-3に示す。造波ソースと斜面開始点の距離は100セル(1波長程度)に固定し、斜面部の岸沖距離は直立堤設置水深に応じて変化させた。岸側および沖側の境界条件は、水平床水路の場合と同じである。CADMAS-SURFに入力するその他の解析パラメータは、水平床水路における計算と同様に表-1に示すとおりとした。

(2) 波高分布

通過波検定時において入射波の有義波周期2.8s, 斜面勾配1/10の場合の岸沖波高分布を図-6に示す。同図に

表-2 計算ケースおよび越波流量算出結果

Case	斜面勾配	換算沖波 波高 ¹⁾ (m)	沖波 波形勾配	直立堤 設置水深 (m)	波検定時 有義波高 ²⁾ (m)	波検定時 有義波周期 ²⁾ (s)	直立堤 天端高 (m)	CADMAS-SURF による 無次元越波流量	高山ら(1982) による 無次元越波流量
A1a	1/30	0.147	0.012	0.450	0.170	2.9	0.08	1.1×10^{-2}	9.6×10^{-3}
A1b				0.30	3.4×10^{-4}	1.2×10^{-4}			
A2a				0.225	0.145	2.8	0.08	9.6×10^{-3}	1.4×10^{-2}
A2b				0.30	4.3×10^{-7}	5.1×10^{-4}			
A3a				0.075	0.078	3.2	0.08	1.3×10^{-3}	1.7×10^{-3}
A3b				0.30	0.0	1.2×10^{-6}			
B1a	1/30	0.141	0.031	0.450	0.134	1.9	0.08	6.2×10^{-3}	3.8×10^{-3}
B1b				0.30	0.0	3.4×10^{-5}			
B2a				0.225	0.143	2.0	0.08	7.5×10^{-3}	7.7×10^{-3}
B2b				0.30	0.0	1.0×10^{-4}			
B3a				0.075	0.070	2.3	0.08	7.6×10^{-4}	7.1×10^{-4}
B3b				0.30	0.0	1.1×10^{-7}			
C1a	1/10	0.151	0.012	0.450	0.175	2.8	0.08	7.9×10^{-3}	1.0×10^{-2}
C1b				0.30	3.0×10^{-5}	1.6×10^{-4}			
C2a				0.225	0.209	2.8	0.08	8.9×10^{-3}	2.6×10^{-2}
C2b				0.30	4.3×10^{-6}	2.3×10^{-3}			
C3a				0.075	0.113	2.9	0.08	4.3×10^{-3}	1.0×10^{-2}
C3b				0.30	8.3×10^{-5}	1.3×10^{-4}			
D1a	1/10	0.153	0.034	0.450	0.145	1.9	0.08	5.9×10^{-3}	4.2×10^{-3}
D1b				0.30	1.4×10^{-5}	7.1×10^{-5}			
D2a				0.225	0.171	1.8	0.08	7.5×10^{-3}	8.4×10^{-3}
D2b				0.30	0.0	3.4×10^{-4}			
D3a				0.075	0.097	1.9	0.08	2.5×10^{-3}	2.6×10^{-3}
D3b				0.30	7.6×10^{-5}	5.3×10^{-6}			

1) 直立堤設置水深0.450mの波検定時有義波高から算出した。 2) 直立堤設置位置の値を示す。

表-3 入射波諸元および計算格子間隔

Case	入射波の 有義波高 H_m (m)	入射波の 有義波周期 T_m (s)	沖波有義波波長 L (m)	水平格子間隔 dx (m)	鉛直格子間隔 dz (m)
A1a ~ A3b, C1a ~ C3b	0.15	2.8	12.2	0.10 ($dx/L = 1/122$)	0.02 ($dz/H_m = 1/7.5$)
B1a ~ B3b, D1a ~ D3b		1.7	4.5	0.05 ($dx/L = 1/90$)	

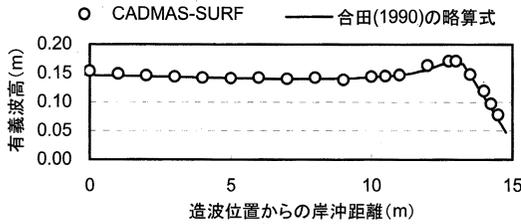


図-6 通過波検定時の波高分布
(斜面勾配: 1/10, 有義波周期: 2.8 s)

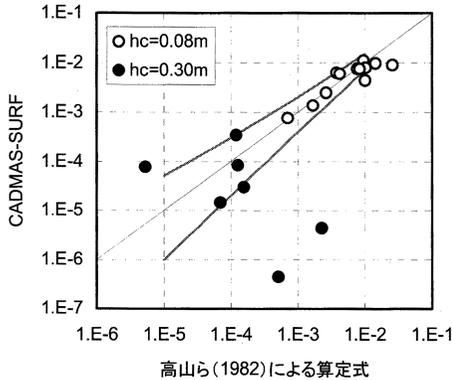


図-7 無次元越波流量に対する CADMAS-SURF の再現性

合田 (1990) の略算式による結果をあわせて示す。同図より、CADMAS-SURF は砕波帯内外にわたって有義波高の岸沖分布を良好に算出しており、他の計算ケースも含めて越波に寄与する波浪変形を精度良く再現できていることを確認した。

(3) 無次元越波流量の比較

各ケースで算出した無次元越波流量を、高山ら (1982) による算定式と比較したものを図-7 に示す。CADMAS-SURF による計算結果は、算定式と全体的に合致しており、上下の直線で表される算定精度の範囲におおむね収まっていることが確認された。ただし、図-7 および表-2 より、無次元越波流量が 10^3 以下である天端高 $h_c = 0.30$ m のケースでは、CADMAS-SURF で越波が発生しない、または越波流量がかなり過小に算出される

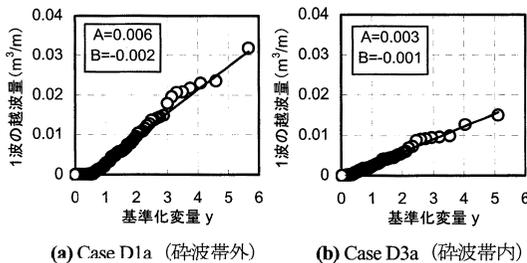


図-8 個別波による越波量のワイブル分布 ($k = 1$) への適合性

ケースが一部あった。これは、越波流量や越波頻度が小さいため結果が計算時間長や計算格子間隔などの計算条件に影響されやすい、あるいは CADMAS-SURF が直立堤天端の高い条件で越波現象を十分に再現できていないなどの原因が考えられるが、詳細については今後検討を行う予定である。

4. 不規則波による越波の確率分布特性

泉宮ら (2006) は消波護岸を対象に越波流量の現地観測を実施し、不規則波による越波の確率分布特性は形状母数が $k = 1$ のワイブル分布に従うことを報告しており、求められた確率分布から超過確率越波流量を算定した。なお、確率変数 x に対するワイブル分布の確率密度 f は、尺度母数 A 、位置母数 B 、基準化変数 y を用いて次式で表される。

$$f = \frac{k}{A} y^{k-1} \exp(-y^k), \quad y = \frac{x-B}{A} \quad (2)$$

ここでは、3. で検討した一様勾配斜面上の越波計算のうち越波が比較的連続して算出された天端高 0.08 m の計算結果を対象に、越波量ならびに波浪の時間特性を考察した。計算結果から1波ごとの越波量を抽出し、これをワイブル分布 ($k=1$) に当てはめ、図-8 に示した。直立堤の水深によらず不規則波による越波の確率分布はワイブル分布 ($k=1$) に良く適合しており、その適合度は泉宮ら (2006) と同程度であることが確認された。

次に、波高頻度を図-9 に示す。砕波帯外で波高頻度はレーリー分布にほぼ合致しており、水深が小さくなると砕波により大きな波高の発生頻度が減少する。これに対応して、図-10 に越波量の確率分布を示すが、水深の小さい $h = 0.075$ m で大規模な越波の発生頻度が減少する様子が全体的に良好に再現されている。この様子は、入射波の周期が小さくなると顕著に現れることが分かる。以上から、CADMAS-SURF により不規則波による越波の確率分布を取得できることが示された。

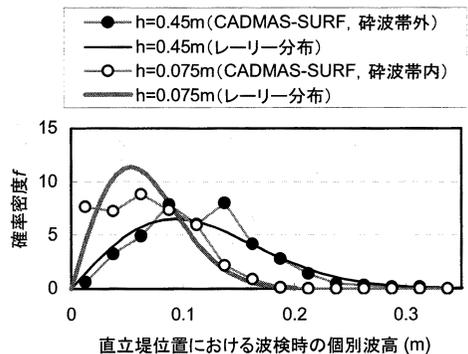


図-9 直立堤設置水深 h による個別波高の確率分布特性
(斜面勾配: 1/10, 有義波周期: 2.8 s)

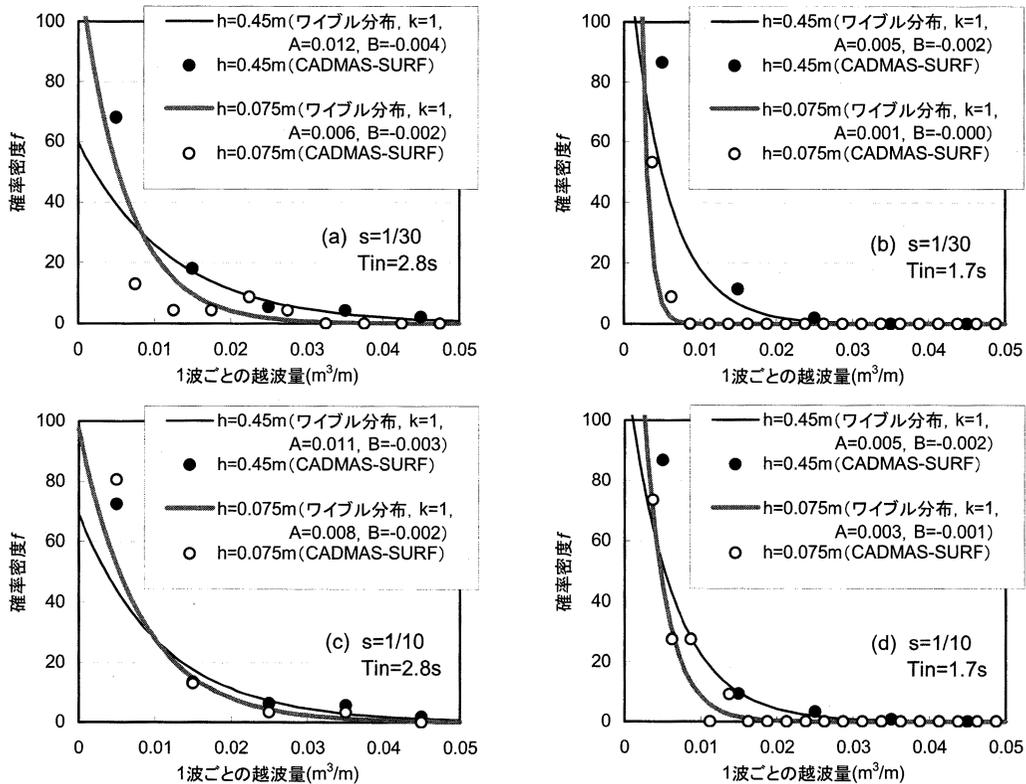


図-10 直立堤設置水深 h による個別越波量の確率分布特性

5. 結論

水平床水路および一様斜面水路に設置した不透過直立堤を対象に、数値波動水路を用いて斜面勾配、波形勾配、直立堤設置水深、直立堤天端高を可変とした比較的広範な条件で不規則波による越波計算を実施し、無次元越波流量 10^3 以下の条件では課題が残るものの、数値波動水路は不規則波による越波流量を既存算定式と同等の精度で算出できることが示された。

また、越波頻度が十分な場合は、数値波動水路により不規則波による越波の確率分布を算出できることが示され、短時間越波流量の検討も可能となった。

参考文献

- 泉宮尊司・濱田良平・石橋邦彦 (2006) : 消波護岸の越波流量の確率分布特性に関する研究, 第53巻, 海工論文集, pp. 716-720.
- 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 (1999) : 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.
- 井上雅夫・島田広昭・殿最浩司 (1989) : 不規則波における越波量の出現分布特性, 第36巻, 海工論文集, pp. 618-622.
- 合田良実・岸良安治・神山 豊 (1975) : 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, 港研報告, 第14巻, 第4号, pp. 3-44.

合田良実 (1990) : 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, pp. 67-68.

北野正夫・目見田哲・八木典昭・殿最浩司 (2001) : 上部スリット式護岸の開発とその背後に設置する越波排水の設計法について, 第48巻, 海工論文集, pp. 751-755.

(財) 沿岸開発技術センター (2001) : 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, 296p.

関本恒浩・国栖広志・清水琢三・京谷 修・鹿島達一 (1992) : 人工島防波護岸の短時間越波特性について, 第39巻, 海工論文集, pp. 581-585.

高山知司・永井紀彦・西田一彦 (1982) : 各種消波工による越波流量の減少効果, 港研報告, 第21巻, 第2号, pp.151-189.

中野 修・興野俊也・藤井直樹・榊山 勉・大熊義夫 (2001) : 数値波動水路による護岸・防波堤の越波・伝達波の数値計算, 第48巻, 海工論文集, pp. 731-735.

中野 修・興野俊也・安田勝則・藤井直樹 (2002) : 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, 第49巻, 海工論文集, pp. 726-730.

藤原隆一 (2005) : 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, 第52巻, 海工論文集, pp. 41-45.

Environment Agency, UK, Expertise Network Waterkeren, NL and Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, DE. (2007) : Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual, pp. 132-133.