# 数値波動水路による越波伝達波の計算

## Numerical Analysis on Wave Transmission over Breakwaters Using VOF-type Numerical Wave Flume

## 松本 朗1

## Akira MATSUMOTO

The applicability of a two-dimensional numerical wave flume CADMAS-SURF (Isobe et al., 1999) for wave transmission over breakwaters is examined by comparing existing experimental data (Goda and Takeda., 1966; Hirakuchi et al., 1991) with the results of numerical computations. Simple vertical breakwaters and composite breakwaters with rubble mound foundation are examined. Throughout this study, it is pointed out that CADMAS-SURF has a possibility to reproduce the wave transmission phenomena precisely for both regular and irregular wave conditions. It will provide assistance in the design of breakwaters by providing an estimate of wave transmission coefficients.

## 1. はじめに

地球温暖化による海面上昇や台風の大型化が懸念され ている.それらに伴う到達波高の増大による防波堤や護 岸からの越波量の増加が危惧される.港内静穏度の計算 では,港口からの入射波に加えて越波による伝達波も考 慮すべき重要な要素である.防波堤への到達波高が大き くなる場合には,越波伝達波が港内静穏度に及ぼす影響 が大きくなる.越波は本来不連続な現象であり,理論や 数値計算による検討は困難であった.そのため実験的な 検討が数多く行われてきた.それらの研究により波高伝 達率の実験式が提案され用いられている.しかし,実験 条件の制約に伴う適用限界の存在は避けられない.

一方,最近では,水理模型実験を代替する手段として VOF法に基づく磯部ら(1999)による数値波動水路 (CADMAS-SURF)が開発されており,その詳細は(財) 沿岸開発技術研究センター(2001)に取りまとめられて いる.越波伝達波に関する検討も行われており,たとえ ば,中野ら(2001,2002)は,消波ブロックで被覆され た直立堤や低天端混成堤,半没水式上部斜面堤ならびに 傾斜堤を対象に,越波伝達波に関するCADMAS-SURFの 適用性を検討している.長谷川ら(2008)は,直立壁か らの規則波・不規則波の越波伝達波の挙動について,計 算条件を広範に変化させた詳細な検討を行っている.こ のように越波伝達波に関する検討がなされているが,そ の適用例はまだ少ない.

そこで、本研究では、数値波動水路CADMAS-SURFに よる規則波・不規則波を対象とした越波伝達波の計算を 行った.はじめに、規則波を対象として、実務でしばし

1 正会員 工修 (株)不動テトラ 総合技術研究所

ば用いられる合田・竹田(1966)の越波伝達率算定図の 元になった模型実験の再現計算を行い,波高伝達率や水 面波形について検討した.次に,不規則波を用いた,平 口ら(1991)の実験の再現計算を行い,越波伝達波の波 高・周期の伝達率および伝達波の周波数スペクトル特性 について検討した.なお,計算結果と実験結果の比較に は,上述した2編の論文中の図から読み取った実験デー タを用いた.

## 2. 規則波越波伝達波

### (1) 模型実験の概要(合田・竹田, 1966)

合田・竹田(1966)はマウンドのない直立堤と基礎マ ウンドを有する混成堤を対象とし,規則波を用いた実験 を実施した.その結果,波高伝達率には静水面上の天端 高と入射波高の比が支配的であること,堤体幅や基礎マ ウンドの高さの影響などを明らかにした.それらに基づ き,波高伝達率の実験式を提案した.この実験では混成 堤の基礎マウンドは不透過としていた.

#### (2) 計算条件

図-1に計算領域を示す.防波堤模型は造波境界から 14mの位置に設置されている.防波堤背後に設置した6 本の波高計で,領域全体の平均的な越波伝達率を評価し



図-1 計算領域(単位:m, h=0.35mのケース)

Case	天端幅 <i>B</i> (cm)	水深 <i>h</i> (cm)	周期 <i>T</i> (s)	天端高 <i>R</i> (cm)	波高 <i>H</i> (cm)
1		35	1.5	0	3.5~14
2-1		50	1.8	-10	$4\!\sim\!20$
2-2	40			-5	2~20
2-3				0	5~20
2-4				5	$5 \sim 20$
3	0.9	50	1.8	-5	14

表-1 計算ケース(直立堤)

表_?	計質ケース	(湿成堤)
23-4	日开ノーハ	

Case	天端幅 <i>B</i> (cm)	水深 <i>h</i> (cm)	マウンド高 <i>d</i> (cm)	周期 T(s)	天端高 <i>R</i> (cm)	波高 <i>H</i> (cm)
1					0	10,20
2	40	50	50	1.8	5	20
3	10	50	50	1.0	10	20
4					20	20

表-3 解析条件

造波モデル	造波境界	
格子間隔 (水平方向)	2.5cm (*)	
格子間隔 (鉛直方向)	1.0cm	
時間刻み	Auto	
差分スキーム	DONOR-0.2 (**)	
粘性	なし	
乱流モデル	未使用	
流速・圧力の境界条件	SLIP	
VOF関数Fの境界条件	FREE	
気泡上昇速度	0.2m/s	
水滴落下速度	3.0m/s	

(\*) B=0.9cmの鉛直壁の計算では,格子問隔を段階的に増減させ,鉛直壁近傍で 格子問隔が0.9cmになるように調整した.

(\*\*) 一部のケースではDONOR-0.1, 0.5を用いた.

た.計算ケースを表-1,-2に示す.また,CADMAS-SURFに入力する解析パラメタを表-3に示す.混成堤の 基礎マウンドは模型実験では不透過であったが,透過性 とした条件でも計算を行った.その場合,空隙率0.43, 慣性力係数1.2,抵抗係数1.0とした.

#### (3) 計算結果

図-2に直立堤の相対天端高と波高伝達率の関係を,実 験値,計算値および実験式を表す曲線で示した.伝達波 高は図-1に示した港内側の波高計から得た波高の平均値 である.計算結果は実験結果によく一致している.防波 堤の天端が没水して波高伝達率が大きい領域では計算値 は実験式から若干外れる傾向にある.この領域は波高の 鉛直格子間隔に対する比率が相対的に小さいことが原因 の一つと考えられる.しかしながら,実験データが少な く計算結果の妥当性については今後検討を行う予定であ



る.実務で対象となる波高伝達率0.5程度以下の条件に 対しては,実用上十分な計算精度を有するものと思わ れる.

図-3に波高水深比 $H_i / h$ と波高伝達率 $K_t$ の関係を示す. 波高伝達率 $K_t$ は波高水深比が0.2以下の領域では, $H_i / h$ の増加とともに増加し,波高水深比が0.2を越えると一定値となる.計算による $K_t$ は, $H_i / h$ が0.2を越える範囲では実験値によく一致するが,波高が比較的小さい $H_i / h=0.2$ 以下では実験値よりも大きい.先に述べた鉛直方向格子の分解能の問題が原因の一つであると考えられる.

図-4に防波堤天端幅B=0.9cm,水深h=50cm,周期 T=1.8s,防波堤天端高R=-5cm,波高H=14cmの条件で 計算した水位の時間波形を実験結果と比較して示す.図 中,x'は鉛直壁背面からの距離である.ここでは,差分 スキームのDONORパラメタを0.1,0.2,0.5と変化させ てその影響を検討した.これはDONORパラメタDによ り,一次精度風上差分をD,二次精度中央差分を(1-D) の割合で重み付き平均する方法である.防波堤の前面で は実測波形と計算波形はよく一致している.防波堤から 1.5mの地点では波の峰と谷の位置にずれが見られ,計算 波形は実験波形を下方にずらしたような形状となってい るが波の位相および波高は概ね一致している.防波堤か ら3.0m及び4.5mの地点では波の位相にずれが見られる ものの,波が分裂を伴いながら港内を伝播していく様子 が再現されている.差分スキームの影響はあまり明確で



図-4 水位時系列の比較 (B=0.9cm, h=50cm, R=-5cm, T=1.8s, H=14cm)



はないものの,本計算ではDONOR-0.2の場合が実験波形 の再現性が最もよい.

図-5はマウンドのある混成堤の計算結果を実験結果と 比較したものである.不透過マウンドの場合の計算値は 実験式にほぼ一致した.マウンドを透過性にすると伝達 率は0.05~0.1程度増加した.倉田ら(1980)は,越波 が少なく伝達波の大部分が透過波と考えられる条件での 混成堤からの波高伝達率として0.02~0.03の値を得てお り,今回の計算値はそれらの値に比べてやや大きい.た だし,ここではマウンドの空隙率,慣性力係数,抵抗係 数は既往の研究成果による値を用いて試算したものであ り,マウンドの透過性が波高伝達率に及ぼす影響につい ては,マウンドの規模等を含めて詳細な検討が必要で ある.

## 3. 不規則波越波伝達波

### (1) 模型実験の概要(平口ら, 1991)

平口ら(1991)は、①矩形ケーソン堤、②台形ケーソ ン堤、③消波ブロック被覆堤、④消波ブロック両面被覆 堤を対象に不規則波による水理実験を行い、越波伝達波 の波高・周期・周波数スペクトル特性について検討し た.これは、従来までの研究が波高や周期の伝達率に関 する検討がほとんどであり、伝達波の周波数スペクトル に関して検討した例が少なかったためである。検討の結 果、天端幅・天端高が異なると伝達波高は変化するが、 スペクトル形状は相似形を保つことや、構造形式が類似 した防波堤の伝達波のスペクトル形状は類似しているこ とを明らかにした.

#### (2) 計算条件

図-6に計算領域を示す.水深は21.5cmの一定とした. 防波堤模型は造波ソースから6.6mの位置に設置した.対象とした防波堤は,天端高h<sub>c</sub>=2.5cm,天端幅B=22cm, マウンド厚d'=6cmの矩形ケーソン堤(図-7)である. 防波堤背後に設置した12本の波高計で,伝達波の波高, 周期,周波数スペクトルの波の伝播に伴う変化を検討した.目標とした周波数スペクトルは,修正Bretschneider-光易型であり,有義波周期,有義波高は表-4に示すとおりである.解析条件で先に述べた規則波に関する値(表-3)と異なる項目は以下の通りである.すなわち,長時間の不規則波の造波を行うため,造波モデルは造波ソー スとした.計算格子間隔は,はじめに水平方向2.0cm, 鉛直方向0.5cmとしたが,計算値と実験値の十分な一致 が見られなかったため,防波堤より港内側のみ水平格子





表-4 通過波の諸元

間隔を1.0cmとした条件でも計算した.水滴落下速度は 自由落下とした.

### (3) 計算結果

#### a) 通過波の特性

はじめに防波堤を設置しない状態で計算を行った.計 算時間は200sであり,解析はそのうちの163.84s(時間間 隔0.04s,データ数4096)を対象とした.計算結果を表-4 と図-8,-9に示す.ここでxは造波ソースからの距離で ある.波の伝播に伴って有義波高は減少し有義波周期は 増加したが,防波堤設置後の計算でもここに示した不規 則波浪を入射させ検討を行った.通過波測定時における 防波堤位置の有義波高を用いて波高伝達率を算定した.

### b) 越波伝達波の伝播特性

図-10に越波伝達波の有義波高の伝達率(H<sub>t1/3</sub> / H<sub>i1/3</sub>)



と有義波周期の変化率(T<sub>11/3</sub> / T<sub>11/3</sub>)を実験結果と比較し て示す. ここでx' はケーソンの港内側の鉛直壁からの距 離、Lsは有義波の波長である.実験による伝達波高の最 高値は防波堤港内側の鉛直壁から1波長以内に現れ、そ の後は伝播に伴い波高伝達率で0.02~0.04程度減衰し, 概ね有義波の波長の2波長分以降で一定となる.計算に おいても波の伝播に伴い伝達波高が減少する傾向が現れ ている.実験による有義波周期の変化率は、伝播に伴い 0.2~0.4程度長くなり、入射波高・周期が大きくなると 有義波周期の変化率は小さくなる.計算においても,実 験ほど入射波高・周期の差異による影響は明瞭ではない が, 伝播に伴い有義波周期の変化率が増加する傾向が現 れている.また,波高伝達率は波の周期ごとに異なる値 を取るのに対して、有義波周期の変化率は、Case1の実 験値はばらついており, また, 実験値と計算値に隔たり が見られるものの、入射波の有義波周期にかかわらず、 波の相対伝播距離でほぼ一本の線でまとまることがわ かる.

図-11にCase3の越波伝達波の伝播に伴う周波数スペク トルの変化を示した.実験では2.5Hz以上の高周波数成 分は伝播するに従い急激に減衰している.計算値は実験 値よりも減衰が著しいが,2.5Hz以上の高周波数成分の 波の伝播に伴う変化が再現されている.



図-12 有義波高の伝達率と有義波周期の変化率(水平格子間 隔1.0cm)

越波伝達波では、入射波の周期に対応した基本周波数 成分の他に、越波の打ち込みによる高調波成分が発生し、 それらが重畳した波形となる.図-10に示したように、 計算による伝達波の周期の変化率が実験値よりも大きい ことや、図-11に示したように計算による周波数スペク トルの高周波数側の減衰が大きいことから、入射波の波 長に対して設定した水平格子間隔ではこれらの高調波を 捕捉できていないものと思われた.そこで、格子間隔が 計算結果に及ぼす影響を検討するために、防波堤より港 内側のみ水平格子間隔Δxを1.0cmとした条件でも計算を 行った.結果を図-12に示す. 水平格子間隔 $\Delta x$ を小さくすることにより、Case2,3 では波高伝達率が増大した.有義波周期が最も短い Case1では $\Delta x$ を半分にしても計算波高の変化は小さかっ た.有義波周期の変化率は3ケースともに実験値に近づ いた.以上から、水平格子間隔を細かくすることにより 伝達波に含まれる高調波を再現することの可能性が示さ れた.

### 4. むすび

規則波に対しては、直立堤・混成堤からの規則波越波 伝達波の水面変動はよく再現され、波高伝達率は既往の 実験式とよい精度で一致した.また、波高伝達率に及ぼ す、混成堤の基礎マウンドの透過性の影響を見積ること ができた.不規則波に対しては、越波伝達波の波高、周 期、周波数スペクトルの、波の伝播に伴う変化の傾向が 再現された.以上から、数値波動水路は越波伝達波を精 度よく見積ることにより防波堤の設計に寄与することの 可能性が示された.しかしながら、本論文では通過波の 検定が不十分であるため、定量的な議論については今後 の課題となる.なお、計算時間は、標準的なパソコン (CPU3.4GHz、メモリ2GB)を使用した場合、Case1で21 時間( $\Delta x$ =2cm)および30時間( $\Delta x$ =1cm)であった.

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」(代表:東京大学大学院・磯部雅彦教授)にお ける研究成果であることを付記し,関係各位へ感謝の意を 表する.

#### 参考文献

- 磯部雅彦・高橋重雄・余 錫平・榊山 勉・藤間功司・川崎 浩司・蒋 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.
- 倉田克彦・巻幡敏秋・桑原正博・川野成仁 (1980) : 混成堤 捨石マウンドからの透過現象に関する考察,海岸工学講 演会論文集,第27回, pp.401-405.
- 合田良実・竹田英章 (1966) :越波による防波堤背後への波 高伝達率,海岸工学講演会講演集,第13回, pp.87-92.
- (財)沿岸開発技術研究センター (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, 457p.
- 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,海岸工学論文集,第48巻, 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,海岸工学論文集,第49巻, pp.726-730.
- 長谷川巌・稲垣茂樹・川崎浩司 (2008) :規則波・不規則波 作用下における直立堤の越波伝達波に対する数値波動水 路の適用性,海洋開発論文集,第24巻,pp.1011-1016.
- 平口博丸・池野正明・大橋裕寿・柏木洋之・樋口豊久 (1991) :防波堤越波後の波の波高・周期・スペクトル特 性,海岸工学論文集,第38巻, pp.506-510.