

数値モデルによる越波量の評価に関する研究

佐 貫 宏*・藤 田 龍**・関 本 恒 浩***・清 水 琢 三****

1. はじめに

一般に, 護岸の越波量算定には合田ら(1975)による越波量算定図表が用いられるが, 適用条件が限られる上に, 算定値が期待越波量であるため不規則波としての波群特性等が十分考慮されていない。特に, 波の波群性に起因する長周期水位変動は, 短時間越波流量の評価に大きな影響を与えるものと考えられる。

一方, 越波量を数値的に求める方法が実用化されつつあり, その方法の1つとして波動方程式により護岸直前の水面波形を計算し, 越流公式を用いて越波量を求める方法が代表的である(例えば森屋ら, 1996)。また, 最近では, 水面の取扱いに VOF 法を採用し, ナビエ-ストークス方程式を差分法で直接解いて波動運動を解析する数値波動水路 (CADMAS-SURF) が磯部ら (1999) によって開発されている。この CADMAS-SURF は, 複雑な断面形状にも対応可能で, VOF 関数の積分値から越波量を高精度且つ直接的に計算できるのが特徴である。ただし, CADMAS-SURF は計算負荷が大きいため, 不規則波への適用にあたっては前者の手法を用いる方が妥当と思われるが, 現在のところ計算精度については詳細に検討されてはいない。

本研究では, 直立壁の越波について, 実験を通して数値モデルを使った越波量算定方法の適用性を確認するとともに, 不規則波への数値モデルの適用性について考察することを目的とした。

2. 数値モデルの概要と越波量算定方法

本研究では, 越波量算定方法として,

- 1) CADMAS-SURF による方法
- 2) 非線形波動方程式に越流公式を適用する方法

の2つの方法について検討対象とした。以下, それぞれについて概要と越波量の算定方法を示す。

2.1 CADMAS-SURF による方法

a) 基礎方程式

* 正会員 修(工) 五洋建設(株)土木本部土木設計部
** 正会員 修(工) 五洋建設(株)技術研究所
*** 正会員 博(工) 五洋建設(株)技術研究所
**** 正会員 博(工) 五洋建設(株)東北支店

CADMAS-SURF では, 榊山ら (1996) のポラスモデルに基づき, 以下に示す 2 次元非圧縮流体の連続式および Navier-Stokes 方程式を基礎方程式としている。

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w u}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - R_x + \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma_x \nu_e \left[2 \frac{\partial u}{\partial x} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma_z \nu_e \left[\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right] \right) \dots\dots\dots (2)$$

$$\lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u w}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w w}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - \gamma_v g - R_z + \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma_x \nu_e \left[\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma_z \nu_e \left[2 \frac{\partial w}{\partial z} \right] \right) \dots\dots\dots (3)$$

ここで, x, z : 水平, 鉛直座標, u, w : 流速の水平, 鉛直成分, ρ : 密度, P : 圧力, ν_e : 分子動粘性係数と渦動粘性係数の和, g : 重力加速度, γ_v : 空隙率, γ_x, γ_z : 水平, 鉛直方向面積透過率であり, C_M を慣性力係数として $\lambda_v = \gamma_v + (1 - \gamma_v) C_M$, $\lambda_z = \gamma_z + (1 - \gamma_z) C_M$ である。

b) 自由表面の取り扱い

自由表面の取り扱いには, 汎用性が高く複雑な自由表面が計算可能である VOF 法を採用している。VOF 法では, 式 (4) に示す VOF 関数 F の移流方程式と, 表面の向きを逐次的に計算することにより自由表面の挙動を解析する。

$$\gamma_v \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u F}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w F}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (4)$$

c) 越波量の算定方法

図一のように計算領域を堤体模型の前後で 2 領域に分け, 堤体背後における VOF 関数 F の面積積分値 F_{sum2} とする。堤体背後の領域を仮想的な越波升と考えれば, F_{sum2} の増分が越波量に相当する。

2.2 非線形波動方程式に越流公式を適用する方法

森屋ら (1996) は, 波の非線形性を考慮できるブシネスク方程式に吉川ら (1967) の越流公式を適用した越波量の計算手法を提案し, 水理実験によってその妥当性を検討している。本研究においても, Madsen ら (1991) の

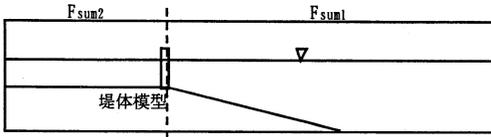


図-1 CDMAS-SURF による越波量算定概要図

修正ブシネスク方程式（補正係数 $B=1/21$ ）を用いて水面波形を評価し、それに越流公式を適用して越波量を算定する。式（5）に越流公式を示すが、この方法による越波流量は、直立壁前面の水位 η の評価と越流係数 m の与え方によって左右される。なお、越流係数は通常 0.5 程度の値をとるとされている。

$$q = \frac{2\sqrt{2g}}{3} m(\eta - h_c)^{3/2} \dots\dots\dots (5)$$

3. 数値モデルの適用性および考察

3.1 規則波による越波量

a) 水理模型実験

規則波を対象とした越波実験を行い、数値モデルの適用性を確認した。実験ケースは、造波波高 10 cm とし、周期 2 種類、水深 2 種類の計 4 ケースとした（表-1）。また、水理模型実験の概要を図-2 に示す。水槽の一端には造波板が設置されており、1/30 斜面勾配の岸端に天端を刃形にカットしたアクリル模型を水槽の内壁にシリコンで接着した。また、実験中は、模型背後に設置した越波升によって越波水の重量を測定するとともに、容量式波高計を用いて模型直前を含め水槽内の 4 ヶ所で水位変動をモニタリングした。なお、データの収録周波数は 20 Hz とし、造波開始より 80 秒間収録した。

b) 計算条件

1)の方法によって越波量を計算する際には、水理模型実験に合わせて各種パラメタを表-2のように設定した。また、計算領域を図-3のように実験水槽を模擬して作成した。

一方、2)の方法で越波量を計算する場合は、水平格子サイズ $dx=10$ (cm)、時間ステップ $dt=0.01$ (s) とし、越流係数 m は実験結果をもとに一定値 0.5 を設定した。

なお、それぞれの計算では、堤体模型のない条件でその直前における波高が実験値と合うように、沖での入力波高を調節することにより波高検定を行っている。

c) 実験結果および計算結果

i) 波高検定

まず、模型のない条件で計算を行い、模型位置での波高について実験値との合わせ込みを行った。表-3 に検定結果を示す。波高は、助走区間が終わって波が安定したと思われる区間で 4~5 波程度取り出し平均値を算出

表-1 実験ケース一覧表

ケース名	造波波高 (cm)	周期 (s)	天端高 (cm)	水深 h (cm)
T15H	10.0	1.5	2.0	68.0
T15L			5.0	65.0
T20H	10.0	2.0	2.0	68.0
T20L			5.0	65.0

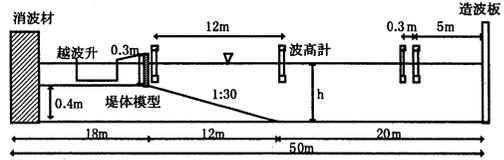


図-2 実験概要図

表-2 計算条件一覧表

項目	検定値
波高	
周期	1.5, 2.0 s
水深 h	65, 68 cm
ΔX	4 cm ($L/112, L/89$)
ΔZ	1 cm ($H/10$)
計算スキーム	DONOR-0.2
計算時間	30 s
ボラス下限値	0.001
造波モデル	造波境界条件
粘性	なし
流速・圧力境界条件	スリップ
VOF 関数 F の境界条件	フリー
気泡上昇速度	0.2 m/s
水滴落下速度	3.0 m/s

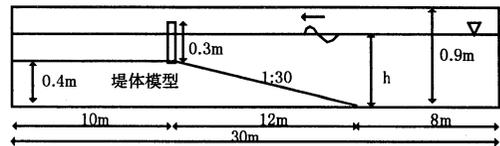


図-3 計算領域図 (規則波)

した。概ね模型位置での波高を実験値と合わせ込むことができた。

ii) 越波流量

次に、計算領域内に模型を設置して、越波量の計算を行った。図-4 は、周期 2.0 s、水深 65 cm のケース (T20L) について、模型前面における水位と越波量の時系列変化を示したものである。実験値と計算値はよく一致し、他のケースについても概ね再現性は良好であった。

また、表-4 は、波高検定区間で平均越波流量を算出し

表-3 波高検定結果

ケース名	模型直前での波高 (cm)		
	実験値	CADMAS-SURF	ブシネスク方程式
T15H	9.00	9.01	8.95
T15L	9.60	9.64	9.60
T20H	12.00	11.99	12.03
T20L	11.80	11.74	11.81

た結果である。およそ2~3割程度の誤差で越波流量が評価できている。ただし、表-4の()内に示したように、波高検定を行わずに一樣水深部の波高(10 cm)をそのまま入力してしまうと、実験値とのずれが大きくなることもあるため注意が必要である。

また、合田(1970)は、規則波および不規則波による直立壁の越波について実験を行っている。本実験は、比較的越波量の多い実験でありケース数も少なかったため、合田(1970)の実験結果も併せて数値モデルの検証を行った。図-5は、2つの異なる天端高に対して $q-H_0'$ 曲線を描き、合田(1970)による実験値と1)の方法による計算値を比較したものである。計算においては、鉛直格子サイズの関係上実験での天端高を表現できなかったため、実験の天端高の条件に近い2種類の天端高に対して計算を実施した。また、図中の H_0' は、模型前面での波高を浅水係数で除した換算沖波波高である。図をみると、実験値と計算値は必ずしも一致していないが、これは厳密に模型前面での波高検定を行っていないためである。しかし、 $q-H_0'$ 曲線の傾向はよく再現されており、数値モデルの越波量算定に対する適用性が確認できた。

3.2 2成分合成波による越波量

a) 計算条件

前節において、数値モデルの規則波の越波に対する適用性を確認した。しかし、1)の方法は計算負荷が大きく、不規則波を扱うことは現在のところ困難である。そのため、ここでは2成分合成波を対象として、1)の方法と2)の方法を比較することにした。

入射波条件については、波高が8.0 cmと同一で周期が1.67 sおよび1.88 sの規則波を重ね合わせてデータを作成し、沖側境界より入射させた。計算領域については、新たに図-6のように設定し、計算時間内(60秒間)において壁での再反射の影響ができるだけ入らないように、規則波での計算に比べて一樣水深部を長くした。また、直立壁の天端高さを9 cmとし、造波板から50 mのところを設置した。なお、その他のパラメタについては表-2と同様である。

b) 計算結果

図-7に、2成分合成波に対する水位と越波量の計算結果を示す。越波時の模型前面における水位波形をみる

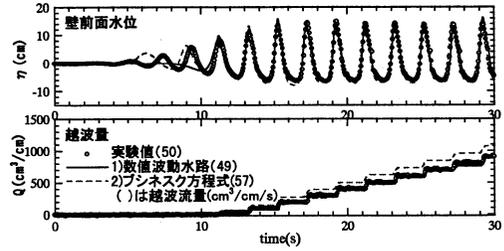


図-4 水位と越波量の時系列(規販波, ケース T20L)

表-4 越波流量の算出結果(規則波)

ケース名	越波流量 (cm³/cm/s)		
	実験値	CADMAS-SURF	ブシネスク方程式
T15H	61	51(82)	56
T15L	34	28(51)	29
T20H	70	83(102)	98
T20L	50	49(75)	57

() は検定を行わない場合の結果

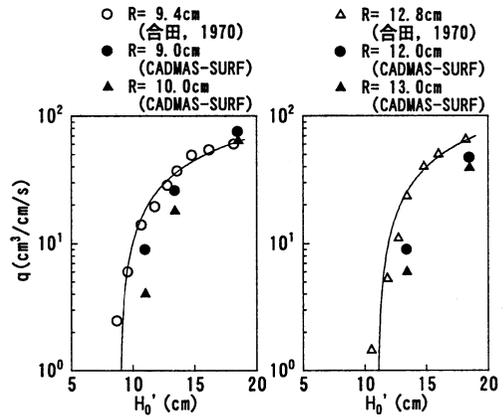


図-5 合田(1970)による実験値と計算値の比較

と、1)の方法に比べてブシネスク方程式を用いた2)の方法の方が波の到達高さが若干低いが、概ね両者の波形は一致した。また、越波量についても、2)の方法の方が1)の方法に比べて小さくなっているが、両者の違いは2割程度であった。

次に、越波量に対する長周期波の影響を調べるため、不規則波を波別に解析し、規則波の連なりとして規則波

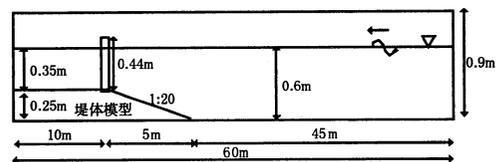


図-6 計算領域図(2成分合成波)

の $q-H_0$ 曲線から越波量を評価することを試みた。まず、周期 1.60 s, 2.00 s の規則波に対して $q-H_0$ 曲線を作成した (図-8)。図中の近似曲線 I および II は、それぞれ周期 1.60 s, 2.00 s の規則波に対する近似曲線であり、4 種類の波高に対応する越波流量から最小二乗法によって求めたものである。続いて、図-7 のように 1) の方法で計算された水位波形を①~⑮の個々の波に分解し、それぞれの周期と波高から近似曲線 I, II を使って越波量を換

算した。その値を $q_{換算値}$ とし、1) の方法によって直接計算された越波量 $q_{計算値}$ と比較した。すると、図-9 の上段に示すように、 $q_{換算値}$ と $q_{計算値}$ には比較的大きな差異があり、不規則波一波一波を規則波に置き換え、規則波の越波量として足し合わせる方法では越波量を精度良く評価できないことがわかった。この両者の差異は長周期の水位変動によるものである。図-9 の下段に波高検定時の時系列波形から 4.0 s 以上の長周期成分を数値フィルターによって取り出したものを示す。長周期の水位変動に対応して、その振幅が正である波番号⑤~⑦、⑬~⑮は計算値が換算値より大きく、逆に振幅が負である波番号⑩~⑫は計算値が換算値より小さくなる傾向にあることが確認できる。

なお、2) の方法では、1) の方法と同様に長周期の水位変動も含めて計算されている。このため、計算負荷を考えると非線形波動方程式に越流公式を適用する方法が実用的であり、不規則波への適用性も十分あると考えられる。

3.3 越流係数について

最後に、越流係数についての検討を行った。実際、表-4 に示した越波流量の再現計算において波高検定を行ったものの、2) の方法による越波流量の計算値は、1) の方法による計算値よりもやや大きく見積もられている。これは、越流係数の与え方によるものである。

ここでは、2) の方法における越流係数の与え方について検討するために、1) の方法による計算値を検証データとして、両者の越波量の計算値が等しくなるような越流係数を求めた。検討ケースを表-5 に示すが、ここでは波高に対する天端高さの影響に着目して、波高については 3 種類、天端高さについては 2 種類設定した。また、模型位置での水深を 25 cm に固定し、波の周期は 1 種類 ($T=2.0$ s) とした。その他の計算条件は表-2 と同様である。

図-10 に、越波流量の算出結果を示す。横軸には堤体の天端高さと波高との比 (相対天端高, h_c/H) をとっている。越流係数は相対天端高によらず 0.40~0.45 のほぼ一定の値をとったが、ここでの検討条件に対しては越流

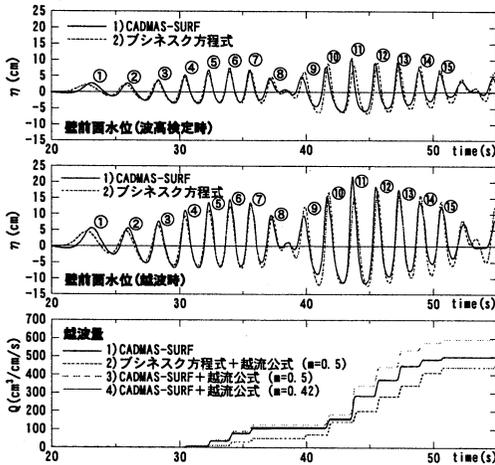


図-7 水位および越波量の時系列 (2成分合成波)

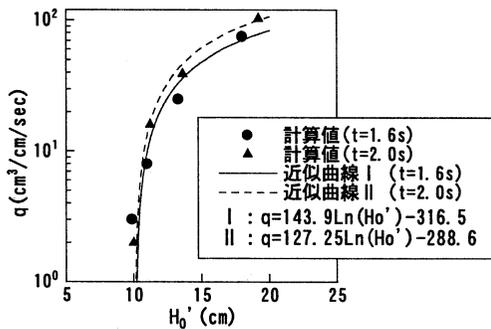


図-8 換算に用いた $q-H_0$ 曲線

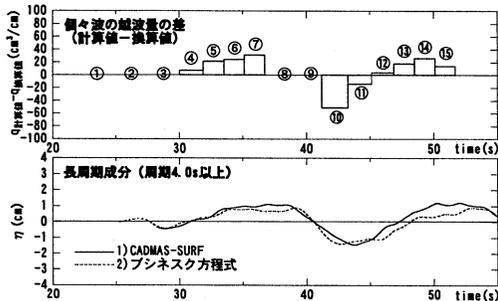


図-9 越波量に対する長周期波の影響

表-5 越流係数検討ケース

ケース記号	造波波高 (cm)	周期 (s)	天端高 (cm)
m-hc 2-1	7.5	2.0	2.0
m-hc 2-2	10.0		
m-hc 2-3	12.5		
m-hc 5-1	7.5	2.0	5.0
m-hc 5-2	10.0		
m-hc 5-3	12.5		

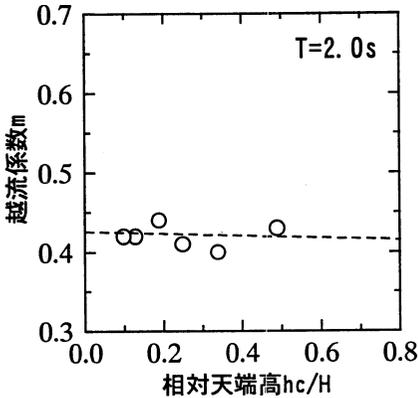


図-10 越流係数と相対天端高との関係

係数の通常値とされる0.5よりも小さくなった。これは、ここでの検討条件が非線形性の強い条件であったためと考えられる。

なお、越流係数を今回行った実験結果から求めると0.47~0.52となった。一方、2成分合成波の場合、1)の方法による計算結果から求めた越流係数は0.42であった(図-7最下段)。

4. おわりに

本研究では、直立壁の越波に着目し、数値モデルを使った2種類の越波量の算定方法について考察を行った。その結果、以下の主要な結論が得られた。

① 実験結果との比較により、越波量算定モデルの規則波への適用性が示された。

② 2成分合成波による越波量を計算した結果、越波量の算定にあたり水位波形の評価には長周期の水位変動を考慮できる非線形波動方程式が有効であることが分かった。

③ また、2)の方法において、本研究の検討条件の範囲では越流係数を0.5程度に設定することにより、2割程度の誤差で越波量を評価できた。なお、ブシネスク方程式は、波の非線形性が強い条件では波形が平滑化される傾向があるため、波浪条件によっては越流係数が変化する可能性があることに注意が必要である。

④ 2)の方法について不規則波への適用性も十分考えられるが、越流係数の与え方に関して今回規則波と2成分合成波に対する検討のみにとどまったため、今後の課題である。

謝辞：本研究は「数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会(代表：磯部東京大学大学院教授)」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します。

参考文献

- 磯部雅彦・高橋重雄・余 錫平・榊山 勉・藤間功司・蔣 勤・秋山 実・大山大洋志 (1999): 数値波動水路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.
- 吉川秀夫・椎貝博美・河野二夫 (1967): 海岸堤防の越波に関する基礎的研究(1), 第14回海岸工学講演会論文集, pp. 118-122.
- 合田良実 (1970): 防波護岸の越波流量に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第9巻 第4号, pp. 3-41.
- 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, 港湾技術研究所報告, 第14巻 第4号, pp. 3-44.
- 榊山 勉・香山真裕 (1996): 消波護岸の越波に関する数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 696-700.
- 森屋陽一・水口 優 (1996): 回折散乱波を考慮した越波問題, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 711-715.
- Madsen, P. A., R. Murray and O. R. Sorensen (1991): A new form of the Boussinesq equation with improved linear dispersion characteristics, Coastal Eng., Vol. 15, pp. 371-388.