

数値モデルによる隅角部を有する護岸越波流量の評価法

藤 田 龍*・森屋 陽一**・関本 恒浩***

1. はじめに

近年、海上空港の建設や港湾構造物の沖合大水深域への展開に伴い、平面波浪場での越波問題が実験的、数値的に取り扱われるようになってきた。実験的には、梯山ら (1994)、平石ら (1994)、富田ら (2000) によって、多方向不規則波浪場における護岸越波流量の特性が調べられている。平面波浪場での越波量の数値的な検討例としては、森屋ら (1996) がブシネスク方程式に堰の越流公式を組み入れて評価し、その適用性を示している。しかし、半無限防波堤に斜め規則波が入射する条件下でのものであり、不規則波への適用性については示されていない。ここで、越波流量の算定に当たっては、越波時の波形の非線形性を考慮する必要がある、特に短時間越波流量については、波群特性や長周期波による水位変動を適切に評価する必要がある (佐貫ら, 2001)。また、平面波浪場においては、隅角部からの回折散乱波や、マッハシステムによる影響の評価が重要となることなどから、その評価には、非線形波動方程式を用いる必要があると考えられる。森屋ら (1995) は周期波のマッハシステムの存在する平面波浪場の計算をブシネスク方程式により検討し、妥当な結果を得ている。

そこで本研究では、ブシネスク方程式に堰の越流公式を適用し、不規則波及び多方向不規則波浪場における隅角部を有する護岸越波流量の数値計算を行い、実験結果との比較を通して、その適用性を検証することを目的とした。

2. 水理模型実験の概要

実験は、図-1 に示す長さ 20 m、幅 30 m の平面水槽を用いて行った。水槽内の一様水深部 ($h=10.0$ cm) には隅角部 (90°) を有する護岸 (鉛直壁) 模型を、造波板に対して 22.5° 傾けて設置した。また、水槽内には消波材を側壁周辺に多数設置し、側壁による反射の影響を除去するよう留意した。

計測器は、模型前面に波高計を 41 台、背面に集水升を 42 個設置し、護岸模型沿いの水位変動及び越波量を測定した。サンプリング間隔は 0.05 s とし、緩起動、緩停止が各 15 s、波作用時間 240 s の計 270 秒間測定を行った。また、波高計及び集水升の設置位置は波向によって適宜変更した。

越波量は造波終了後に集水升の重量を測定し、計測前の重量を差し引くことによって求めた。また、一部の集水升については升内の水位変動も測定し、越波量の時系列も求めた。実験ケースは表-1 に示すように、 $H_{1/3}=2.0$ cm、 $T_{1/3}=1.0$ s の単一方向不規則波、多方向不規則波を、主波向 -7.5° 、 $+7.5^\circ$ で与えることとした。このとき護岸への入射角は、それぞれ (30° , 60°)、(15° , 75°) となる。また、越波時の天端高は 2.0 cm としたが、天端高を 10.0 cm にすることにより、非越波時の模型前面の水位変動も測定した。

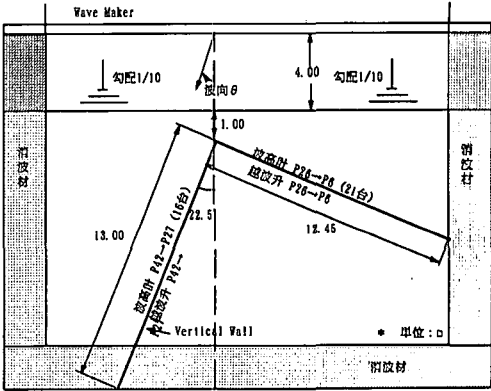


図-1 平面実験概要図

表-1 実験ケース一覧

有義波高 (cm)	2.0
有義波周期 (s)	1.0
波向 (deg)	-7.5, 7.5
天端高 (cm)	10.0 (非越波), 2.0 (越波)
波の種類	単一方向不規則波 多方向不規則波 ($S_{max}=25$)

* 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
(現 国土交通省国土技術政策総合研究所)
*** 正会員 博(工) 五洋建設(株)技術研究所

3. 数値計算の概要

3.1 モデル方程式

数値計算には基礎方程式として式(1)～(3)に示す、Madsenら(1991)の修正ブシネスク方程式(補正係数 $B=1/21$)を用いた。なお、今回の実験ケースは非碎波条件で、底面もコンクリート床のため、碎波減衰項および摩擦項は考慮しなかった。また、非線形計算の議論をするために数式の中の非線形項(式(2),(3)の左辺第2,3項)を除いた計算も行った。

連続式

$$\frac{\partial \eta}{\partial z} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{PQ}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \epsilon P \\ = \left(B + \frac{1}{3} \right) h^2 \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q}{\partial x \partial y} \right) \\ + Bgh^3 \left(\frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial x \partial y^2} \right) \quad \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \epsilon Q \\ = \left(B + \frac{1}{3} \right) h^2 \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial^2 Q}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial y} \right) \\ + Bgh^3 \left(\frac{\partial^3 \eta}{\partial y^3} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^2 \partial y} \right) \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここで P 、 Q はそれぞれ x 、 y 方向線流量、 η は水位、 h は水深、 D は全水深($=h+\eta$)である。また ϵ はエネルギー吸収帯の吸収係数である。

計算は、各時間ステップ毎に線流量 P または Q を水位 η と連動させて解くADI法を用いて行った。空間的な格子幅は有義波周期に対応する波長の1/20、時間刻みは有義波周期の1/50程度として、150～200波を作用させた。

3.2 入射波の作成

入射波は、藤畑ら(1998)を参考に、シングルサメンション法により512の周波数成分波を重ね合わせて作成した。不規則波の周波数成分波は、プレットシュナイダー・光易型の周波数スペクトルをエネルギー等分割し、各成分間の位相は乱数により決定し、線形合成した。また、多方向不規則波の各周波数成分波の波向は、方向集中度 $S_{\max}=25$ の光易型方向分布関数を用いて決定した。ここで、主波向は、波高検定時の構造物隅角部位置での流速の共分散から求められる主波向が実験値と合うように設定した。

以上の方法で作成した成分波から水位変動と、水位変動から計算した水平2成分の線流量の時系列を、造波境界での各格子位置において計算し、入力データとした。

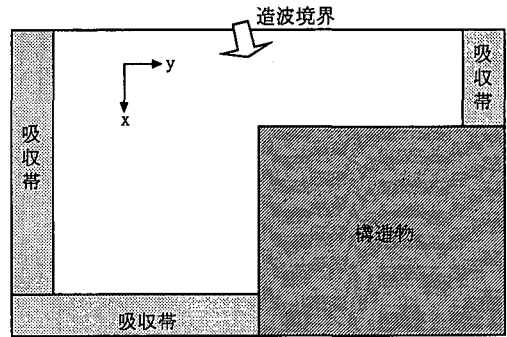


図-2 計算領域図

3.3 境界条件

堤体は図-2に示すように、格子による凹凸の影響をなくするため、格子に沿うように設定した。側方境界及び岸側境界にはEricら(1993)の、双曲線型の吸収関数を用いてエネルギー吸収帯を設定した。

造波境界においては、時々刻々の反射波の波向を求め、線形長波理論により反射波を吸収させた。

また、構造物境界は森屋ら(1996)と同様に、護岸前面の水位 η_e に堰の越流公式(式(4),(5))を適用した。このとき X 軸に垂直な構造物境界では P のみ、 y 軸に垂直な構造物境界では Q のみに越流公式を適用した。これによって構造物境界における越波流量を時系列的に求めることができる。

$$P, Q = \frac{2\sqrt{2}g}{3} m (\eta_e - H_c)^{3/2} \quad \eta_e \geq H_c \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$P, Q = 0 \quad \eta_e < H_c \quad \dots\dots\dots (5)$$

また、森屋ら(1996)は越流係数 m を1.0として検討しているが、断面2次元で検討した佐貫ら(2001)によると m は0.5程度である。そこで本検討では1.0, 0.5の両方を用いて計算を行った。

4. 計算結果及び考察

4.1 越波流量分布の比較

図-3～6に入射角 $+7.5^\circ$ 及び -7.5° の単一方向不規則波及び多方向不規則波による有義波高及び平均越波流量分布の実験結果及び数値計算結果を無次元化して示す。横軸は隅角部からの距離 x を波長で除し、図-1の波高計P26からP6の側を正、逆を負として表現している。また、縦軸の有義波高は入射波高、越波流量は換算沖波を用いた図中の諸量で除して無次元化した。

波高検定時及び非越波時の有義波高分布は、実験値と良く一致しており、隅角部を有する構造物が存在する波浪場でのブシネスク方程式の適用性を示している。平均越波流量分布は非越波時の有義波高分布に対応して変動している。ただし、実験値と計算値の波高検定時の有義

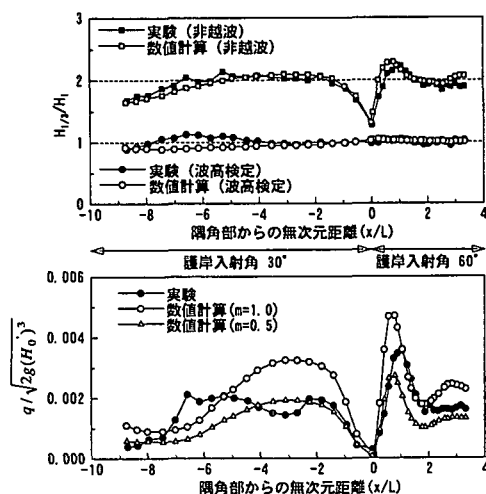


図-3 有義波高及び平均越波流量分布
(単一方向不規則波 -7.5°)

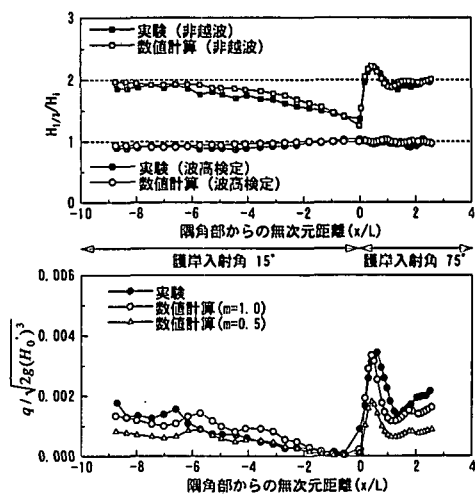


図-5 有義波高及び平均越波流量分布
(単一方向不規則波 $+7.5^\circ$)

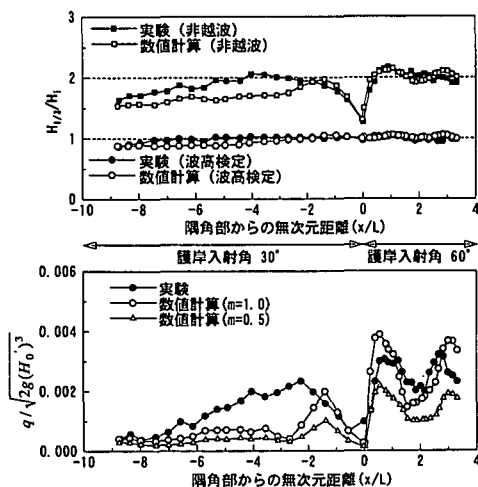


図-4 有義波高及び平均越波流量分布
(多方向不規則波 -7.5°)

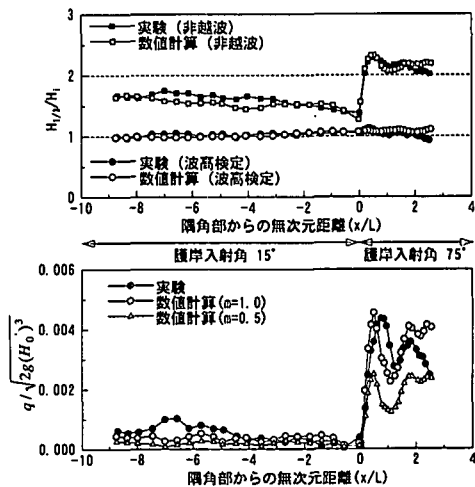


図-6 有義波高及び平均越波流量分布
(多方向不規則波 $+7.5^\circ$)

波高が必ずしも一致していないため、場所によっては2倍程度の違いが生じている。しかし、越波流量が護岸前面の波高のわずかな違いによって大きく変動することを考慮すると、本計算法で十分定量的な評価が可能であると思われる。また、越流係数を0.5にすると、平均越波流量は越流係数が1.0のときのほぼ半分となる。実験値と計算値で有義波高の大小にばらつきがあるため、ここから越流係数の最適値を決定することは困難である。ただし、0.5～1.0の範囲内で設定すれば、実用上十分な精度で越波流量を推定することができる。

4.2 短時間越波流量の比較

ここでは関本ら(1992)と同様の手法で、1～5波間の平均越波流量の最大値を算定し、短時間越波流量特性

について検討した。検討した箇所は、単一方向不規則波浪場において、越波流量が大きくなる領域である。図1～10に入射角 $+7.5^\circ$ 、 -7.5° の単一方向不規則波及び多方向不規則波による短時間越波流量の比較結果を示す。ここで、図中の計算値は $m=1.0$ のケースのものであるが、短時間越波流量を平均越波流量で無次元化した値は、越流係数による影響は少ないと考えられる。

計算結果は入射角が異なるケースでも実験結果と比較的よく一致しており、場所の違いによる短時間越波流量特性を良く捉えている。ただし、全体的には実験結果よりやや小さくなっている。ブシネスク方程式では、その分散特性や格子間隔と波長の関係により、不規則波の波群波形が伝播するにつれて引き延ばされたようになり、

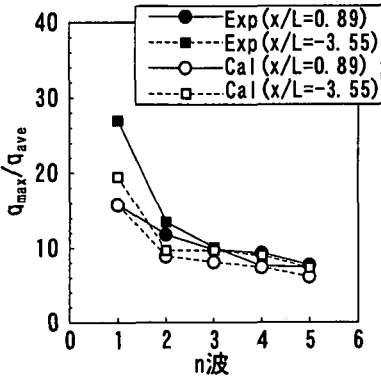


図-7 短時間越波流量の比較
(単一方向不規則波 -7.5°)

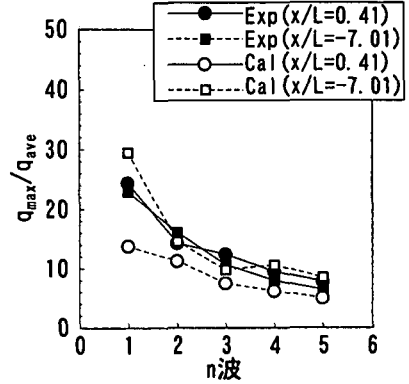


図-9 短時間越波流量の比較
(単一方向不規則波 +7.5°)

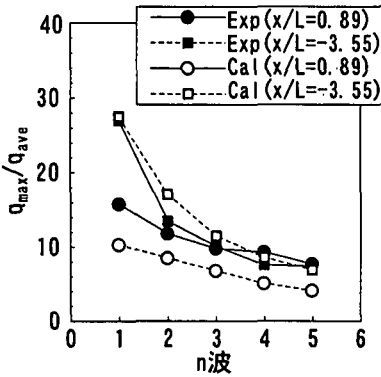


図-8 短時間越波流量の比較
(多方向不規則波 -7.5°)

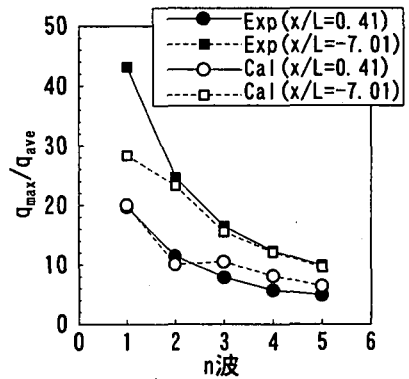


図-10 短時間越波流量の比較
(多方向不規則波 +7.5°)

最大越波流量を過小評価することなどが考えられる。

4.3 非線形性の影響について

ここでは、式(2)、(3)中の非線形項を取り除いた計算を行い、越波流量に及ぼす非線形性の影響について考察する。図-11、12に入射波向-7.5°の単一方向不規則波による線形計算結果を、これまでの計算結果と合わせて示す。図-11で、 X/L が-4~-3の付近に着目すると、非越波時の波高検定値と越波流量の大小関係が逆転している。また、 x/L が0~2の付近においても非越波時の波高検定値が大きいかかわらず、越波流量の差は少ない。すなわち線形計算結果は全体的に越波量を少なく見積もっており、このことは波の非線形性により波の先端が天端を越える回数が増えることを考慮すれば妥当な結果である。また、今回のケースでは顕著に現れていないが、護岸への入射角が小さい場合は、マッハステムの影響も考えられることから、越波量の評価には非線形波動方程式を用いることが望ましいといえる。なお、図-12に示す短時間越波流量特性は、線形計算結果の方が実験結果に近くなった。最大越波流量は非線形性の影

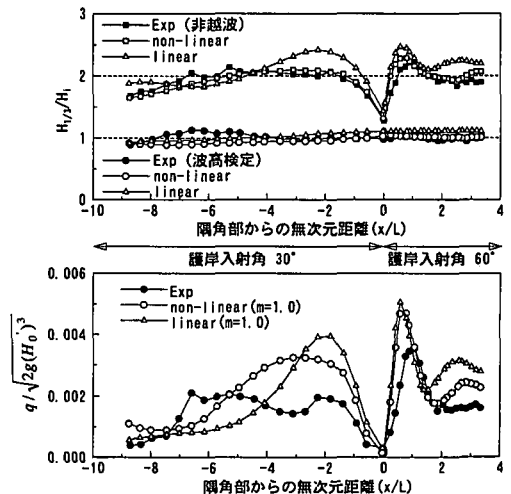


図-11 線形計算による有義波高及び平均越波流量分布
(単一方向不規則波 -7.5°)

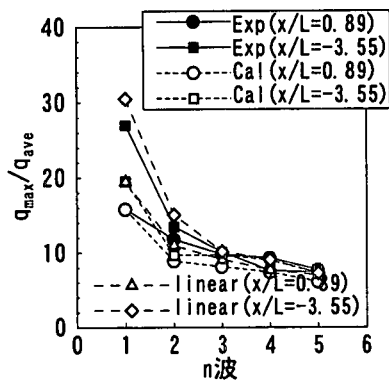


図-12 線形計算による短時間越波流量特性
(単一方向不規則波 -7.5°)

響による変動を受けにくく、非線形計算に比べて相対的に小さな平均越波流量で除したことにより、実験結果に近づいたと考えられる。

5. おわりに

ブシネスク方程式に堰の越流式を組み入れ、隅角部を有する護岸沿いの越波流量分布と短時間越波流量特性の数値計算を行い、実験結果との比較を通してその適用性を検証した。その結果、本計算法で越波流量及び短時間越波流量の評価がある程度可能であることが分かった。また、線形計算との比較から、非線形波動方程式による計算の有効性を示した。ただし、越流係数の値は0.5~1.0としており、その理論的な設定方法については今

後の課題である。

参考文献

- 榊山 勉・鹿島遼一・窪 泰浩 (1994): 多方向不規則波に対する人工島防波護岸の越波特性と耐波特性, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.656-660.
- 佐賀 宏・藤田 龍・関本恒浩・沼水琢三 (2001): 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.
- 関本恒浩・国栖広志・沼水琢三・京谷 修・鹿島遼一 (1992): 人工島防波護岸の短時間越波特性について, 海岸工学論文集, 第39巻, pp.581-585.
- 富田孝史・河合尚男・海原敏明・平石哲也 (2000): 隅角部を有する消波ブロック被覆式護岸の多方向不規則波による越波特性とブロックの安定性, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.886-890.
- 平石哲也・望月徳雄・鈴木康正 (1994): 護岸越波流量における波の多方向性の影響, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.666-670.
- 藤畑定生・秦 禎勝・森屋陽一・中山晋一・関本恒浩 (1998): 現地観測による港内長周期波浪流速特性とその予測法に関する検討, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.306-310.
- 森屋陽一・菊池正行・松立博樹・水口 優 (1995): 浅海域における周期波のマッハ反射について, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.6-10.
- 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.
- Eric Cruz・横木裕宗・磯部雅彦・渡辺 晃 (1993): 非線形波動方程式に対する無反射境界条件について, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.46-50.
- 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.