

浅水方程式を用いた波のうちあげ計算

—海岸護岸・消波工のある場合—

宇 多 高 明*・伊 藤 弘 之**

1. ま え が き

海岸堤防や護岸の設計を合理的に行うためには、現地海岸における複雑な地形・構造物条件のもとで波のうちあげ高を予測する計算手法を確立せねばならない。従来、護岸形状や海底地形条件を考慮した波のうちあげ高の算定法としては、Saville(1958)の仮想勾配法や中村ら(1972)の修正仮想勾配法が用いられてきた。しかし、これらの方法は簡便ではあるが、物理現象を忠実に表わすとは言えない欠点がある。また、消波工による波のうちあげ高の低減効果を評価する適当な算定法はなく、その評価は主として実験に頼ってきたのが現状である。そこで、本研究では浅水方程式を差分化することにより、護岸形状および消波工条件を取り入れ、波のうちあげ高を算定する手法についての検討を試みた。碎波帯内の流体運動は非常に複雑ではあるが、ボア状の長波と見なせば流体運動をかなりの精度で浅水方程式により表現できる(宇多ほか, 1989)。また、消波工を均一な透水層と見なし、そこに抗力、慣性力が働くとするれば、浅水方程式に消波工の効果を導入することができる。以上の点より、ここでは自然海浜、直立護岸、傾斜護岸を想定した3種類の斜面に関し、浅水方程式を用いて水面形の再現計算を行い、水位の時間・空間波形および波のうちあげ高を実験結果と比較する。

2. 実験方法

実験には長さ150 m、幅0.6 m、深さ1.4 mの波浪実験水路を用いた(図-1)。造波板より88 mの位置から

30 mの区間を1/50 勾配斜面、それより10 mの区間には深さ0.4 mの水平床を設け、その上に1/10 勾配斜面を設置した。沖合の水深は1 mとした。実験ではそれぞれ3種の斜面および消波工模型に関し、2組の波浪を作用させた。斜面模型は、1/10 勾配斜面を基本とし、それに直立壁と1/1 勾配斜面を加えたものの計3種類である(図-2 参照)。

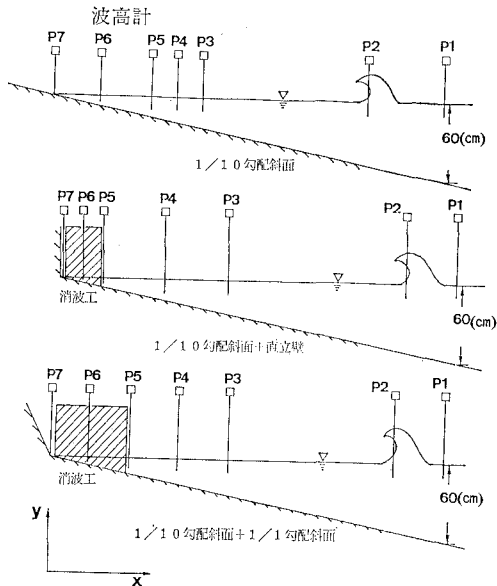


図-2 断面形状と波高測定位置

また解析のための座標系として、初期汀線位置を原点として沖向きにx軸、鉛直上方にy軸を定めた。消波工模型は、ブロックの種類と消波工の形状を変えた計3タイプである(表-1 参照)。消波工としては、図-2 に斜

表-1 消波工のタイプ

消波工模型	ブロックの種類	設置範囲(cm)	体積(cm ³)	空隙率
①	中空三角	2 ≤ x ≤ 15	100	0.68
②	テトラポット	2 ≤ x ≤ 20	130	0.67
③	中空三角	2 ≤ x ≤ 30	100	0.68

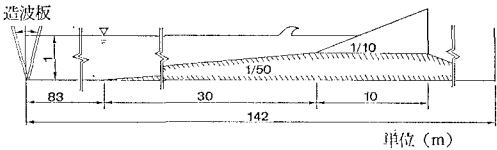


図-1 実験水路

* 正会員 工博 建設省土木研究所海岸研究室長
** 正会員 工修 建設省土木研究所海岸研究室研究員

線で示す範囲に網目 3 cm の金網製のワクを作り、その中に異形コンクリートブロック模型を約 20 cm の高さまで乱積した。消波工模型の天端高は十分高くし、実験中波峰が消波工より上に到達しないようにした。入射波条件は、換算沖波波高が $H_0=10$ cm で、周期が $T=1.47$ s および 1.28 s である。波高は水深 60 cm の P1 地点と砕波帯内の P2~P7 地点で測定した（図-2 参照）。消波工を設置した場合には、砕波点（P2）、初期汀線位置（P7）、P2 と P7 の中点（P3）、消波工の沖端（P5）、消波工の中央部（P6）、P3 と P5 の中点（P4）に測点を配置し、消波工なしの場合は初期汀線から沖側へ 40 cm、20 cm の地点にそれぞれ P5、P6 を定めた。波のうちあげ高は、1/10 勾配斜面および 1/10 勾配斜面+1/1 勾配斜面については遡上波の先端をビデオカメラで撮影して求め、また 1/10 勾配斜面+直立壁については P7 地点において測定された 1 周期ごとの最高水位をうちあげ高とした。実験では斜面や消波工からの波の反射がかなり発生するため、多重反射が生じる前に測定を終えた。その間約 10 波の波形を測定した。

3. 数値計算の方法

砕波帯内の流体運動は、浅水方程式により近似することができる。本研究では、消波工内の流体運動にも長波近似が成立すると仮定し、消波工の効果を浅水方程式に導入する。消波工を均一な透水層とすると、消波工内における連続式および浅水方程式は式(1)、(2)により表わせる（近藤・武田, 1983）。ここに、 η : 初期水面からの水位、 M : 単位幅流量、 h : 静水深、 D : 全水深 ($h+\eta$)、 λ : 消波工の空隙率、 F_D , F_I : 消波工より受ける抗力および慣性力、 F_R : 摩擦損失項である。ここに、砕波によるエネルギー損失は摩擦損失に含める。

$$\lambda \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} = -F_D - F_I - F_R \quad \dots\dots\dots (2)$$

抗力項は、Dupuit-Forchheimer 則を単位幅流量を用いて表わす式(3)となる。

$$F_D = \left(\alpha + \beta \frac{|M|}{D} \right) M \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 α および β は消波ブロックの代表径 d 、水の動粘性係数 ν 、および消波ブロックの特性値 α_0 , β_0 を用いて式(4)、(5)のように求められる。ここで代表径とは消波ブロック個体の体積の 3 乗根である。

$$\alpha = \alpha_0 \frac{(1-\lambda)^3}{\lambda^2} \frac{\nu}{d^2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\beta = \beta_0 \frac{(1-\lambda)}{\lambda^3} \frac{1}{d} \quad \dots\dots\dots (5)$$

慣性項は、付加質量係数 κ を用いれば、式(6)となる。

$$F_I = -(1+\kappa)(1-\lambda) \left(\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) \right) \quad \dots\dots (6)$$

摩擦項は Manning の粗度係数 n を用いて式(7)とした。ただし波が遡上している状態では、真野・加藤(1987)より式(8)とした。この場合、波が遡上状態であるかどうかを判定しなければならないが、本計算では全水深が 0.5 cm 以下となった場合遡上状態にあるとした。

$$F_R = \frac{gn^2}{\lambda} \frac{|M|M}{D^{10/3}} \quad D > 0.5 \text{ cm} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$F_R = 12.4 \nu \frac{M}{D^2} \quad D \leq 0.5 \text{ cm} \quad \dots\dots\dots (8)$$

以上を式(2)の浅水方程式に代入し、整理すると式(9)が得られる。ここで、 $\tau=1+(1+\kappa)(1+\lambda)$ である。

$$\frac{\tau}{\lambda} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\tau}{\lambda} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \alpha M + \beta \frac{|M|}{D} M + \begin{cases} \frac{gn^2}{\lambda} \frac{|M|M}{D^{10/3}} & D > 0.5 \text{ cm} \\ 12.4 \nu \frac{M}{D^2} & D \leq 0.5 \text{ cm} \end{cases} = 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

本研究では、式(1)および式(9)を Leap-frog 法を用いて差分化（後藤・小川, 1982）し、計算を進めた。

沖側の境界条件としては実験より得られた時間波形を沖側境界より入力させた。また岸側の境界条件としては、1/10 勾配斜面、1/10 勾配斜面+1/1 勾配斜面の場合は遡上波の先端条件として岩崎・真野(1979)の方法を用いた。このとき遡上波先端が dry か wet かを判断する判別水深として 0.1 mm を設定した。これに対し、1/10 勾配斜面+直立壁の場合の境界条件は、直立壁による完全反射条件であり、境界において流量 0 をとすれば満足される。これには境界上の節点を G とし、それより岸側に仮想節点 $G-1/2$ を設け、 $M_{G-1/2} = -M_{G+1/2}$ とすればよい。

次に、消波工による抗力、慣性力を表わす各項に含まれる消波ブロックの特性値 α_0 , β_0 については、富永・坂本(1968)が水理模型実験より求めた値を用いた。すなわち、乱積の場合テトラポットで $\alpha_0=2100$, $\beta_0=2.2$ 、中空三角ブロックで $\alpha_0=9600$, $\beta_0=4.7$ である。また慣性力を決定する付加質量係数 κ は消波ブロックごとに求められていないが、目安として 1.0 を用いた。Manning の粗度係数は 0.01 とした。

4. 計算結果

それぞれの斜面、消波工、入射波条件において 8 周期間計算を行い、時間・空間波形およびうちあげ高を求めた。沖側境界はいずれの場合も P3 地点とした。以下に述べる時間波形は消波工の中央および岸側に位置する P6, P7 の 2 地点で比較することとする。また、波峰お

よび遡上波先端の位置より位相を判断し、実験時に撮影したビデオより、計算結果とほぼ同位相で互いに位相が $T/2$ 異なる2つの水面形をトレースした。1/10 勾配斜面+直立壁の場合、直立壁前面で水面形勾配が大きくなること、また 1/10 勾配斜面+1/1 勾配斜面の場合、1/1 勾配斜面上で計算精度が落ちることを考慮して、式(1)、(9)を差分化する場合の x 軸方向の格子幅 Δx 、時間間隔 Δt は表-2のように定めた。以下、図-2に示す3つの断面

表-2 計算条件

斜面	Δx (cm)	Δt (sec)
1/10勾配斜面	2	2×10^{-4}
1/10勾配斜面+直立壁	2, $x \geq 5$; 0.2, $x < 5$	2×10^{-5}
1/10勾配斜面+1/1勾配斜面	2, $x \geq 0$; 0.2, $x < 0$	2×10^{-5}

形ごとに消波工の有無に関して水位の時間・空間波形を比較する。この場合周期の効果も同時に調べるため、消波工なしでは $T=1.47$ s の場合を、消波工有では $T=1.28$ s の場合の計算結果を示すこととする。

(1) 1/10 勾配斜面

消波工の有無による時間波形の相違を図-3に示す。

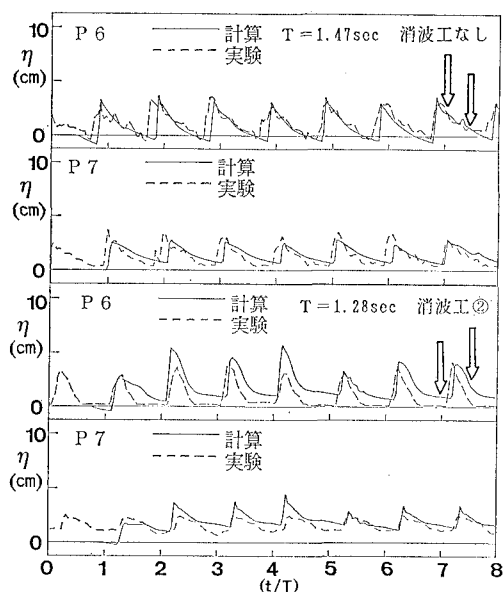


図-3 1/10 勾配斜面上の代表地点における時間波形

ここに、波形は P6, P7 地点の値を示した。消波工なしの場合、波形はかなりよく再現されているが、P7 地点で約 $T/10$ の位相遅れが見られる。それに対し消波工有の場合、P7 地点での位相はよく合っているが、計算による平均水位が過大になっている。同様に空間波形を図-4に示す。空間波形は図-3に矢印で示す $t/T=7.0$ お

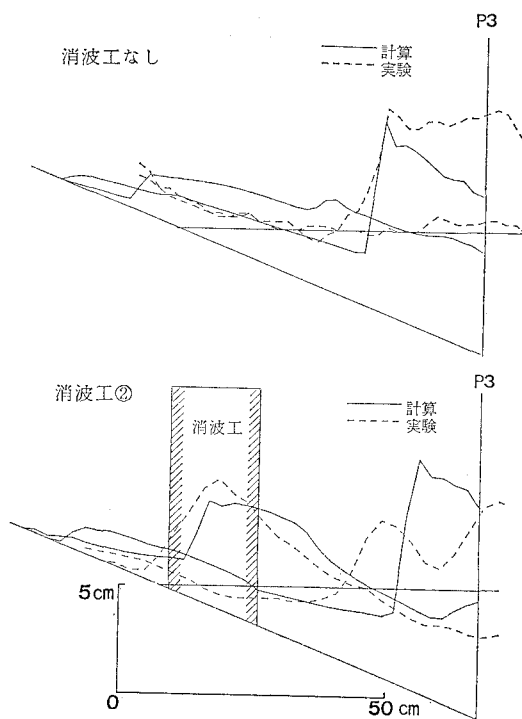


図-4 1/10 勾配斜面上の空間波形

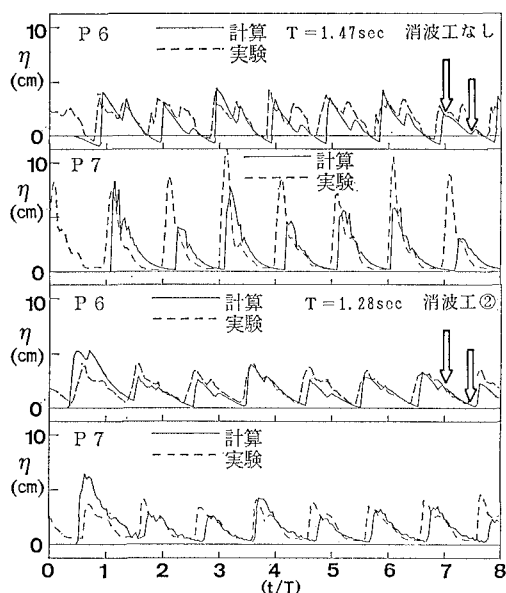


図-5 1/10 勾配斜面+直立壁の場合の代表地点における時間波形

よび 7.5 におけるものである。消波工なしの場合、実験、計算とも段波状の波形がよく表われている。消波工有の場合には消波工の内部を含め、波形の再現性はかなり高い。ただし、P3 地点付近の実験波形には計算波形のよう

に鋭く上がった波峰が見られず、凹んだ形状を示す。これは碎波による波形の巻き込みが生じたことを表わしているが、この種の波形変化は本計算では再現できない。

(2) 1/10 勾配斜面+直立壁

消波工の有無による P6, P7 地点における時間波形の相違を図-5 に示す。消波工なしの場合、入射波、反射波の波形とも計算により良好に再現されている。P7 地点での計算結果はパルス状の波形をよく表わしているが、波高がやや低めに出ており、位相遅れもわずかに生じている。この理由は次のように考えられる。実現象では直立壁に大きな衝撃波圧が作用し、この波圧により波が高くうちあげられる。しかし、浅水方程式では長波を前提とするため、①有限振幅性を考慮した高次の項が省略されること、②直立壁前面の圧力を静水圧近似すること、および③鉛直方向流速を無視していることなどからうちあげ高が過小評価されたと考えられる。これに対し消波工有の場合では消波工なしの場合のようなパルス状の波形は見られない。これは、波が直立壁に到達するまでに、消波工により流速が十分小さくなったためであり、直立壁前面で顕著な衝撃波圧や鉛直方向流速が生じないために浅水方程式により実現象をよく表わすことができたことを意味する。次に、図-4 と同様の位相におけるこれら2ケースの空間波形を図-6 に示す。消波工なしの場合、波形は合っているが、直立壁前面における著しい水位上昇は再現されておらず、また水位の上昇範

囲も小さい。それに対し、消波工有の場合では直立壁前面における顕著な水位上昇は生じず、計算結果は実験値をかなりよく再現している。

(3) 1/10 勾配斜面+1/1 勾配斜面

消波工の有無による P6, P7 地点における時間波形の相違を図-7 に示す。消波工なしの場合では P6 地点に

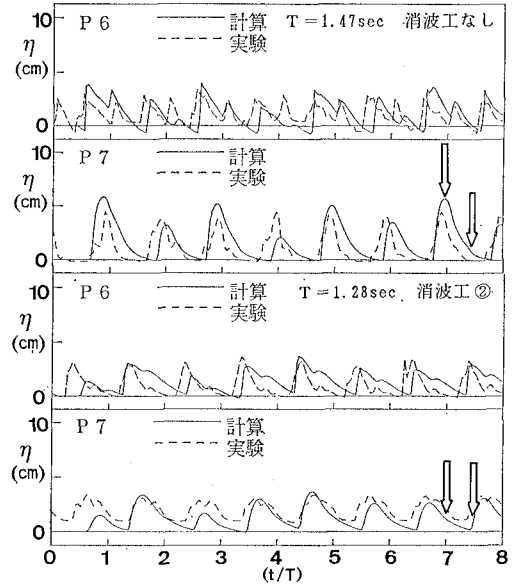


図-7 1/10 勾配斜面+1/1 勾配斜面の場合の代表地点における時間波形

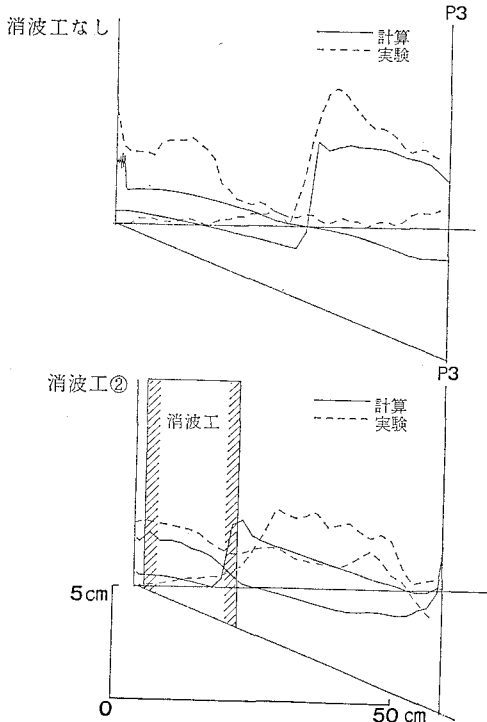


図-6 1/10 勾配斜面+直立壁の場合の空間波形

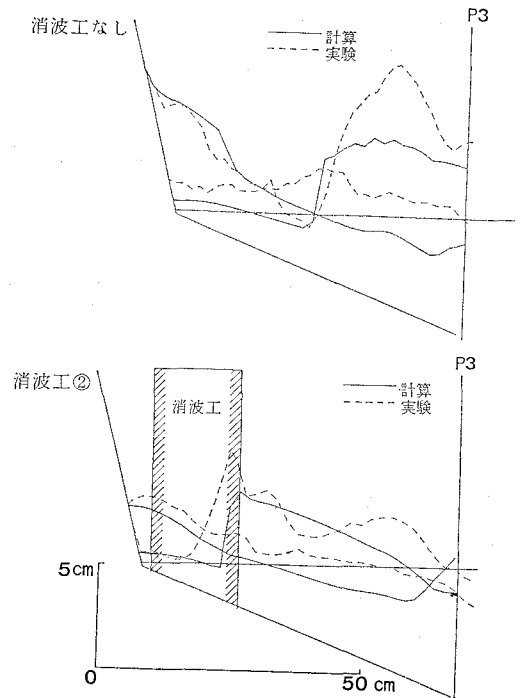


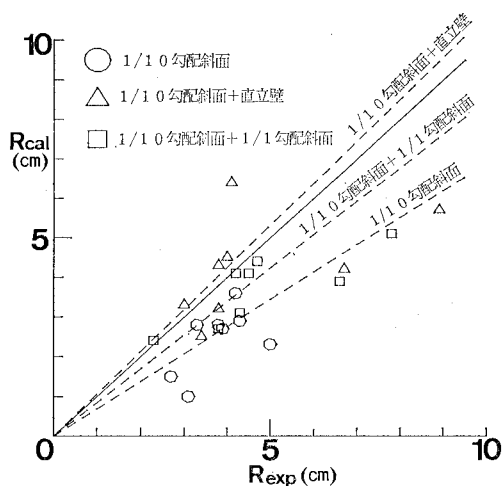
図-8 1/10 勾配斜面+1/1 勾配斜面の場合の空間波形

おける実験波形に顕著な反射波が見られるが、計算でも勾配急変部からの波の反射がよく表わされている。P7地点の計算による波形はかなりとがっているが、波峰は丸みを帯びており、実験ともよくあっている。この理由は勾配急変部において、1/10 勾配斜面+直立壁の場合のように大きな衝撃波圧が生じなかったためと考えられる。消波工有の場合では P6, P7 地点において波形、位相とも再現されており、斜面形状と消波工の特性が同時に評価されていることが分かる。さらに、図—4 と同一位相におけるこれら2ケースの空間波形を図—8 に示す。両者とも波形がよく合っている。特に 1/1 勾配斜面へ水面がすりつく様子がよく再現されており、勾配の急変や消波工の効果が計算によりよく表わされていることが分かる。

本計算により、3種類の斜面において時間、空間波形とも比較的良好に再現されることが分かった。特に消波工有の場合は、消波工の内部においても波形を正確に再現しているが、このことは本研究で行った消波工のモデル化の妥当性を示している。

(4) 波のうちあげ高の比較

波のうちあげ高の計算結果と実験結果を図—9 に示す。



図—9 実験と計算によるうちあげ高の比較

碎波には不規則性が伴うため、ある程度のばらつきがあるが、全体として $R_{cal} = R_{exp}$ を中心に分布しており、消波工の効果がよく再現されている。各斜面ごとに計算精度を検討するため、誤差率と原点を通る回帰直線を求めた。うちあげ高が大きいほど計算誤差も大きくなるため $R_{exp}^{-1/2}$ を重みとして最小自乗法により直線を求めた。また、誤差率は $\sqrt{\sum (R_{exp} - R_{cal})^2 / R_{exp}^2 / N}$ とした。ここに N は各斜面ごとのケース数である。回帰直線を図—9 に、計算誤差を表—3 に示す。3種類の斜面の中で1/10

表—3 回帰係数と誤差率

斜面	回帰係数	誤差率
1/10勾配斜面	0.69	0.40
1/10勾配斜面+直立壁	1.06	0.30
1/10勾配斜面+1/1勾配斜面	0.85	0.24

勾配斜面の誤差率は最も大きく、また回帰係数は一番小さい。このことは実験値に対し計算結果が過小評価される傾向があることを示す。図—3 に見られるように、1/10 勾配斜面では初期汀線に位置する P7 地点においても時間波形はよく合っていることから、うちあげ高が過小評価される原因は遡上計算にあると考えられる。この点については今後さらに検討する必要がある。1/10 勾配斜面+直立壁の場合は誤差率が0.3程度となるが、回帰係数はほぼ1である。この斜面の場合は、直立壁前面における過大な波圧および鉛直流速を計算で表わせないことが誤差の原因と考えられる。最後に、1/10 勾配斜面+1/1 勾配斜面では、誤差率が最も小さく、回帰係数も1に近い値を示す。1/10 勾配斜面+1/1 勾配斜面では、1/10 勾配斜面の場合に比べ遡上距離が短いこと、また1/10 勾配斜面+直立壁の場合のように、過大な衝撃波圧や鉛直流速が生じないことが3種類の斜面の中で精度が最も高くなった原因と考えられる。

5. 結 論

①消波工を均一な透水層として浅水方程式に導入し、自然海浜、直立護岸および傾斜護岸を想定した3種類の斜面において再現計算を行った。その結果、斜面形状や消波工の有無に応じて、異なる時間・空間波形を再現することができた。

②波のうちあげ高を求めたところ、各斜面において実験結果と比較的近い値が得られた。ここで提案した方式がうちあげ高の予測モデルとして使用可能であることが分かった。

参 考 文 献

- 岩崎敏男・真野 明 (1979): オイラー座標による2次元津波遡上の数値計算, 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 70-74.
- 宇多高明・小俣 篤・羽成英臣 (1989): 碎波帯および波打ち帯における波浪変形の数値計算, 土木技術資料, Vol. 31, No. 10, pp. 56-61.
- 後藤智明・小川由信 (1982): Leap-frog 法を用いた津波の数値計算法, 東北大学工学部土木学科, p. 52.
- 近藤俊郎・武田英章 (1938): 消波構造物, 森北出版, 275p.
- 富永正昭・坂本忠彦 (1970): 異形ブロックの抵抗係数について, 第25回年講演集, pp. 69-70.
- 中村 充・佐々木泰雄・山田譲二 (1972): 複合断面における波の打ち上げに関する研究, 第19回海岸工学講演会論文集, pp. 309-312.
- 真野 明・加藤聡也 (1987): 段波の陸上遡上時の摩擦特性, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 16-20.
- Saville, T., Jr. (1958): Wave run-up on composite slopes, Proc. 6th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 691-699.