

透過式潜堤による非碎波波浪の低減効果 およびその評価手法について

DISSIPATION OF NON-BREAKING WAVES ON A PERMEABLE SUBMERGED MOUND SIMULATED BY A BOUSSINESQ TYPE MODEL

田島芳満¹・小塚将之²・大島香織²

Yoshimitsu TAJIMA, Masayuki KOZUKA and Kaori OHSHIMA

¹正会員 Ph.D. 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

²正会員 工修 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

This paper presents the modeling of Boussinesq type model that focuses on predictions of dissipation of non-breaking waves propagating on a permeable submerged mound. The model applies the same concept as formerly presented Boussinesq type model that combines both water and porous layers into one layer and solves depth-averaged current velocity by adjusting the "effective depth" of the combined layer as functions of a height and a porosity of the porous media. This feature enables the model to easily predict wave run-up on a porous media. The present model also solves the other set of non-linear shallow water wave equations to separately solve the current velocity within the porous media. This porous flow velocity is used to evaluate the wave dissipation rate due to the porous media because the depth-averaged velocity may be larger than the one in the porous media and therefore yield too large wave dissipation rate. The model predictions are compared and show excellent agreement with newly performed experimental data, in which periodic long-waves propagate on a permeable submerged mound.

Key Words : *wave dissipation in a porous media, Boussinesq equations, permeable submerged mound*

1. はじめに

近年、港内に係留された船舶が長周期波によって動揺して荷役稼働率が低下するという問題が生じている。その対策として沖合の防波堤の延伸や消波構造物の設置などが提案されている。しかし、沖合の防波堤の整備には多大なコストと施工領域の確保が必要となる。また、従来の構造物前面に配置する消波構造物では、その設置位置が水平流速の比較的小さい重複波の腹付近となるため、とりわけ長周期波に対して十分な消波機能を持たせるためには、消波構造物の規模が膨大になり、景観や港湾機能などの観点で実用性に乏しいのが現状である。

一方、人工リーフのような潜堤型構造物では、比較的大きな構造であっても景観を損なわないなどのメリットもあるが、従来型の不透過式潜堤では来襲波を強制的に碎波させることによって消波効果を得るため、長周期波のように水深の低減による碎波そのものが期待できない場合には、有効な消波機能が得られない。これに対して、透過式潜堤では、堤内を流れる流速を低減させることに

よってある程度の消波効果が期待できるものの、実際の消波機能については、その評価手法も含めて検討の余地があると考えられる。

透水層を有する場における波浪場の算定モデルについては、多くの研究がなされている。たとえば磯部ら¹⁾や喜岡ら²⁾は、透水層とその上部の水域の二層それぞれで非線形波動方程式を導き、透過式潜堤上を伝播することによって減衰し、また波の非線形性の影響によって分裂する波浪変形の再現を試みている。一方、Madsenら³⁾は透水層の空隙率を考慮した仮想水深を彼らの修正 Boussinesq 方程式⁴⁾に導入して、単層の運動方程式を解くことによって、透水層上を遡上する波動を精度良く再現している。また、平山ら⁵⁾は Madsen・Sorensen⁴⁾の修正 Boussinesq 方程式を透水層内へ拡張し、実際の消波構造物の形状を、全水深に設置した透水層の空隙率を変化させることによって再現し、任意の消波工に対する波浪場のエネルギー減衰の再現を試みている。ただし、後者の単層モデルでは自由水面が消波構造物の境界面と交差したり、波浪場が消波構造物上を遡上したりする場合の波

浪場を比較的容易に再現できるものの、単層の断面平均流速に基づくモデルであるゆえに、透過性潜堤など、透水層が水没している条件では透水層内の流速が正しく算定できず、透水層によるエネルギー減衰率を適切に評価できない可能性が考えられる。

そこで本研究では、モデルの実用性も勘案し、まずMadsenら³⁾の単層の修正Boussinesq方程式に、鹿島・長谷川⁶⁾と同様の管路抵抗モデルを導入して、透水層を有する場合における波浪場の減衰・変形を計算する。ただし、管路抵抗モデルによるエネルギー損失の計算には、非線形長波方程式を用いて別途算定した透水層内の流速を用いることによって、潜堤のように透水層が没水した条件におけるモデルの適用性を向上させる。また、新たに定常流による実験を実施し、構築したモデルをそのまま用いることによって、管路抵抗モデルにおける損失抵抗係数を決定する。さらに、透過性潜堤上に波形勾配の異なる様々な規則波を入射させる実験を行い、モデルによる再現計算を通じて構築したモデルの妥当性を検証する。最後に、同じ来襲波条件に対する不透過式および透過式潜堤上での波浪変形の実測値および計算値を比較し、透過式潜堤による非碎波波長の減衰効果について考察を加える。

2. モデルの概要

(1) 基礎方程式

図-1に本モデルに用いる座標系と主な変数の概要を示す。非線形波動場の算定には、次に示すMadsenら³⁾の透水層による仮想水深を考慮した修正Boussinesq方程式を用いる。

連続式：

$$\varepsilon \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

運動方程式：

$$\left(\frac{\tau_v}{\lambda} \right) \frac{\partial P}{\partial t} + \left(\frac{\tau_x}{\lambda} \right) \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{A} \right) + gA \frac{\partial \eta}{\partial x} + \Psi_x + D_{sp} = 0 \quad (2)$$

ここで P は線流量、 η は自由水面水位、 ε は自由水面 $z=\eta$ における空隙率、 Ψ_x はブシネス方程式における分散項であり、 D_{sp} は後述する透水層における減衰項である。本研究では非碎波波長による波浪減衰に着目しているため、碎波によるエネルギー減衰項は無視した。 A は空隙部分のみを考慮した水深を表す「空隙水深」で、空隙率の鉛直分布 ε を用いて次式で算定する。

$$A = \int_0^{h+\eta} \varepsilon dz \quad (3)$$

ただし、透過層のない水域では $\varepsilon=1$ である。 τ は空隙率 ε および慣性力係数 C_M を用いた次式で算定する。

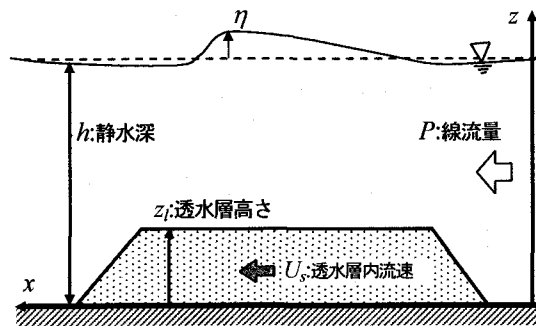


図-1 透水層モデルの概要

$$\tau_v = \frac{1}{h+\eta} \int_0^{h+\eta} \varepsilon + (1-\varepsilon) C_M dz \quad (4)$$

$$\tau_x = \frac{1}{h+\eta} \int_0^{h+\eta} \varepsilon^{2/3} + (1-\varepsilon^{2/3}) C_M dz \quad (5)$$

本研究ではSollitt・Cross⁷⁾に倣い $C_M=1.0$ とした。また、 λ は全水深に占める空隙水深の割合を示す無次元量であり、次式で算定される。

$$\lambda = A/(h+\eta) \quad (6)$$

最後に、透水層による減衰項 D_{sp} は、鹿島・長谷川⁶⁾と同様に次式の管路抵抗モデルで算定する。

$$D_{sp} = \frac{f_s}{4R} \frac{z_l}{2} |U_s| U_s \quad (7)$$

ここで f_s ：透水層による抵抗係数、 z_l ：透水層高さ、 R ：透水層を管路とみなした場合の径深、 U_s ：透水層内における流速である。透水層による抵抗係数 f_s は、透水層を構成するブロックの形状や大きさ、ブロックの積み方などによって変化するが、本研究では、テトラポッドによる乱積み堤を想定して、次節に示す実験から f_s の算定式をレイノルズ数 $R_e=U_s 4R/\nu$ の関数として定義する。ここで $\nu=1.01 \times 10^{-6} (\text{m}^2/\text{s})$ は水の動粘性係数である。さらに鹿島・長谷川⁶⁾に倣い、テトラポッドの径深 R はテトラポッドの高さ h_t を用いて $R=0.103h_t$ で算定する。

最後に、透水層内の断面平均流速 U_s は、次に示す透水層内での非線形長波方程式で別途算定する。

$$\tau_v \frac{\partial U_s}{\partial t} + \tau_x U_s \frac{\partial U_s}{\partial x} - \tau_x U_{st}^2 \frac{\partial z_l}{\partial x} + g\varepsilon \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{f_s}{4R} \frac{1}{2} |U_s| U_s = 0 \quad (8)$$

ここで左辺第三項は透水層の境界面を通過する水平流速の移流項であり、 U_{st} は境界面上での水平流速である。本研究における数値モデルでは、移流項に3次の風上差分を用いて、 U_{st} を式(2)のBoussinesq方程式の運動方程式で算定される断面平均流速で代表させた。

(2) 抵抗係数 f_s の算定

本研究で再現対象とする乱積みテトラポッドによる透水層の抵抗係数 f_s を算定するために、次に示す実験を実施した。

a) 実験概要

幅60cmの断面二次元水槽に図-2のような天端幅10cm、高さ25cm、法勾配1:4/3のテトラポッドを全断面乱積みとした堤体を設置し、上流側に波高計と流速計を、下流側には波高計のみを設置した。水槽内の水を循環させることにより定常流を発生させ、堤体の上流側で水位と流速を、下流側で水位をそれぞれ測定した。流量は上流側の水位及び流速から算定したが、流速は水槽壁面の影響を受けるため、水槽中央の上層、中層、下層および上層で壁側にずらした点の4点で計測を行い、それらの結果から平均流速分布を対数則に基づいて内挿し、断面平均流速を算定した。テトラポッドの模型は130gと630gの2種類の模型を用い、それぞれの模型に対して流量を5段階に変化させ、そのときの堤体前後の水位、流速を計測した。

b) 実験結果に基づく抵抗係数 f_s の算定

抵抗係数 f_s は、透水層内の流速 U_s によって変化するため、本論文で提案したような数値モデルに式(7)のような管路抵抗モデルを適用する場合には、任意地点における流速 U_s に対応した f_s を首尾よく算定する必要がある。そこで本研究では、以下に示す手順で提案した数値モデルを上述の定常流による実験結果に直接適用することで、 f_s の算定を試みた。

まず、抵抗係数 f_s の近似式を鹿島・長谷川⁹⁾と同様にレイノルズ数 $Re=4RU/\nu$ の関数として次式で定義する。

$$f_s = aRe^{-1} + b \quad (9)$$

上式の第一項は、相対流速が小さい層流境界条件時に卓越し、その値が流速(Re)に反比例するのに対して、第二

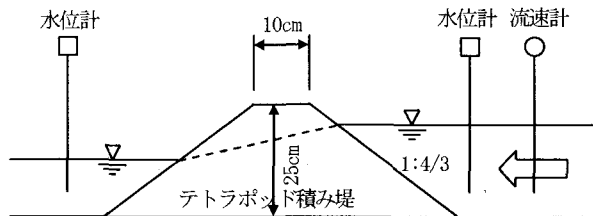


図-2 定常流による抵抗係数算定実験の概要

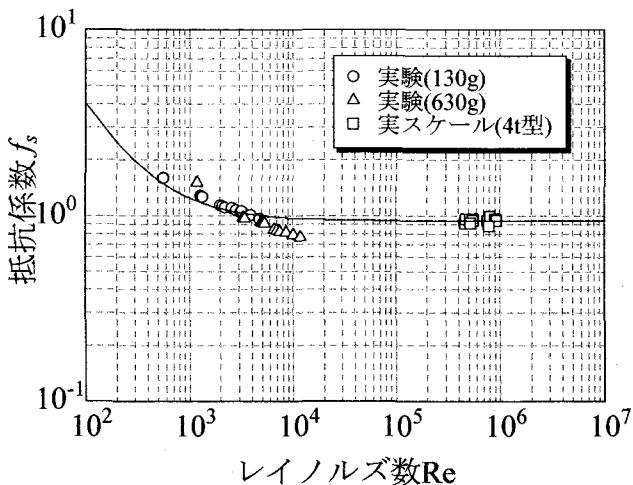


図-3 乱積みテトラポッドによる抵抗係数の実験結果と近似式

項は粗面乱流境界条件時に卓越し、その値は流速によらず一定となる。鹿島・長谷川⁹⁾によれば、彼らが抵抗係数の算定に用いた実スケールのテトラポッドによる実測結果では、上述のレイノルズ数が 10^5 オーダーとなり、このときの抵抗係数は流速によらずほぼ一定となった。そこで本研究では、まず鹿島・長谷川⁹⁾の用いた九州電力株式会社川内火力発電所放水路における放水流量と減勢工前後における水位差の測定値それぞれに対して、抵抗係数 f_s を一定とした本モデルを適用し、測定結果を最も良く再現できた抵抗係数 f_s を抽出した。このようにして抽出した f_s の平均値から $b = \bar{f}_s = 0.94$ を算定した。

次に上述した実験条件に本モデルを適用し、実測した水位の全データを最もよく再現できる係数 a および b をパラメタスタディにより抽出した。抽出した係数による再現計算結果から、堤内上流部、中央部および下流部の3地点での抵抗係数を抽出し、得られた結果を前述の実スケールにおける f_s の算定結果とともにレイノルズ数 Re の関数としてプロットした(図-3)。最期に $b=0.94$ とした条件で、これらの実験の再現計算により得られた抵抗係数分布を最も良く近似する係数として $a=310$ を算定した。室内実験結果に基づく a の算定では、最初から $b=0.94$ に固定した条件で最適な a を抽出する方法も考えられた。しかしながら、図-3に見られるように、テトラポッドのサイズが大きい630gの模型を用いた実験結果ではレイノルズ数が 10^4 程度と比較的大きかった条件で抵抗係数 f_s が0.94よりも小さくなった。このため、本研究では上述の方法を用いて最適な抵抗係数 f_s を算定した。630gのテトラポッドを用いた室内実験で抵抗係数がやや小さくなった原因としては、テトラポッドのサイズを大きくしたことによって水槽の底面および壁面の付近の空隙が大きくなり、この部分で通水しやすくなったことなどが考えられる。なお、抵抗係数の算定誤差に伴う波浪減衰の数値計算誤差については、後述するモデルの検証で考察を加える。

3. モデルの検証

構築したモデルの妥当性を検証するために、次のような波浪実験を行い、計算結果と比較した。

(1) 実験および計算条件

延長50m、幅60cm、深さ1.2mの断面二次元水槽に図-4のように1/20勾配の斜面とテトラポッドを全断面乱積みとした透過式潜堤を設置した。潜堤の設置水深は23cm、堤体の高さは13cm、延長は2mとし、テトラポッドの模型は130gのものをを用いた。また、対照実験として、透過式潜堤と同形状の不透過式の潜堤を設置した条件についても実験を行った。水槽内には容量式波高計を造波板前面に1台、造波地点からの1/20勾配斜面を上りきった地点に1台、潜堤の前後に3台ずつ、潜堤の両肩に1台ずつをそれぞれ設置して時々刻々の水位変化を周波数

20Hzで測定した。岸側には消波層を設置したが、今回の実験では比較的周期の長い波を対象としたために、波を完全に吸収することはできなかった。このため、モデルによる再現性の検証には、消波層からの反射波が波高計設置地点に戻ってくるまでの時系列データのみを用いた。以上の実験条件に対して、表-1に示す波形勾配の異なる様々な規則波を入射させ、潜堤上及び潜堤周辺における水位や流速変動を計測した。不透過式潜堤のケースを含む全ての実験条件で碎波は見られなかった。

数値計算には、空間格子間隔を $\Delta x=5\text{cm}$ としたスタaggerドメッシュを用い、鄭ら⁸⁾と同様に移流項を除く空間微分形式には、1次微分に4次オーダーの、2次および3次微分に2次オーダーの中央差分スキームを用いた。また、移流項には2次の風上差分を用いた。また、時間微分形式の差分間隔は $\Delta t=0.01\text{s}$ とし、Adams-Bashforth-Moultonの予測子・修正子法を用いて基礎式を離散化した。実験では、造波板を正弦的に振動させたので、数値計算においても入射波の時系列は正弦波のそれと与えた。岸側には5mのスポンジ層を設置し来襲波を吸収させた。

表-1 入射波条件

CASE	波高(cm)	周期(s)
1	2.90	4.0
2	2.36	6.0
3	2.59	8.0

(3) 再現性の検証

a) 透過式潜堤上の波浪変形計算

図-5にそれぞれの入射波条件(Case1~3)における計算結果と実験値との比較結果を示す。図中の測点8における水位の時系列波形の比較には、透水層による減衰項 D_{sp} を考慮した場合(太実線)と無視した場合(細実線)の計算結果を示し、実験結果(破線)と比較した。また、図-5に示した潜堤周辺の波高分布は、実験および計算した自乗平均波高 H_{rms} である。図に見られるように、減衰項 D_{sp} を無視した場合には、すべてのケースで計算による波高が実験値よりも大きくなった。これに対して、減衰項 D_{sp} を考慮することによって、数値モデルによる水位変化の時系列波形は実験結果をより良く再現できていることが分かる。また、Case1における自乗平均波高の実測値では、潜堤通過後の波高分布に緩やかな増減が見られ、

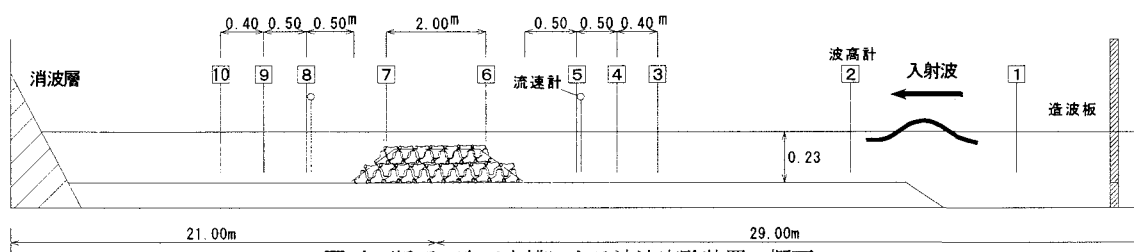


図-4 断面二次元水槽による波浪実験装置の概要

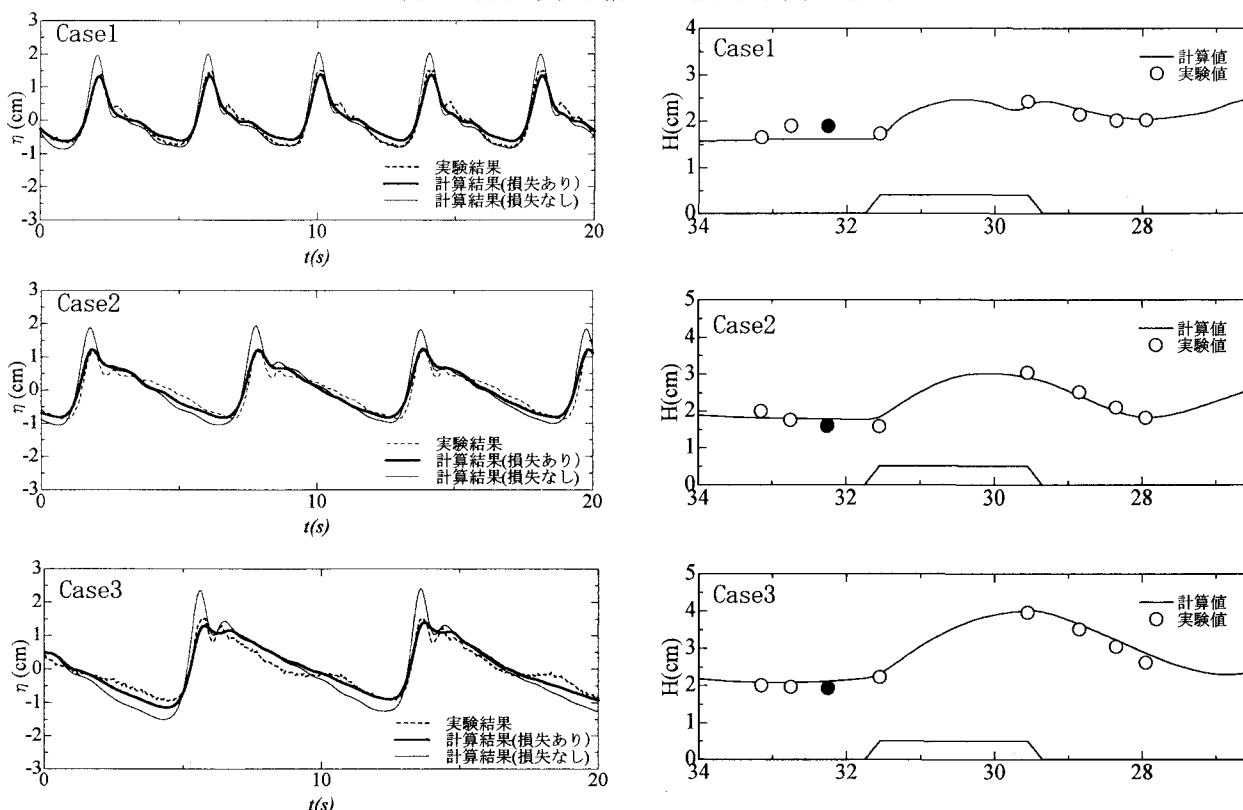


図-5 Case 1~3における透過式潜堤周辺での波高分布および測点8(●)における水位の時系列変化

特に測点8では、計算による予測値が実測値を下回った。これは、図中の時系列波形の比較に見られるように、モデルによる数値計算結果では潜堤通過後の分裂波をやや過小評価する傾向があったためであると推察される。しかしながら、モデルによる自乗平均波高の計算値は、潜堤沖側(右側)での部分重複波による波高分布や、潜堤岸側(左側)での透過波の波高を概ね良く再現できている。ここで示した波浪実験に対する再現計算では、モデルのキャリブレーションを一切行わずに、定常流による実験結果から算定した抵抗係数をそのまま用いた数値計算を行っている。このこと勘案すれば、本モデルは透過式潜堤による波高減衰予測計算において優れた妥当性を有していると考えられる。

b) 透水層内流速の検証

本モデルでは、透水層内における流速を非線形長波方程式によって別途算定することによって、没水した潜堤によるエネルギー減衰を妥当に再現できるように工夫した。ここでは、本モデルによる計算結果と、Madsenら⁴⁾のBoussinesq方程式によって計算した断面平均流速をそのまま透水層内流速として透水層による減衰項を算定した場合(以下一層モデルと呼ぶ)の計算結果とを比較して、本モデルにおける計算方法の妥当性を検証する。

図-6に、CASE2の入射波条件に対する本モデルと一層モデルによる計算結果のうち、測点7(潜堤の岸側肩部)における水位時系列波形と測点6(潜堤の沖側肩部)および7における透水層内流速を比較する。ただし、透水層内流速は水理実験では測定していないため、モデルによる計算結果のみを示した。図に見られるように、一層モデルによる測点7における水位変動量は、実測値および本モデルの計算結果に比べて小さくなった。これは、測点6および測点7における透水層内流速波形の比較で明

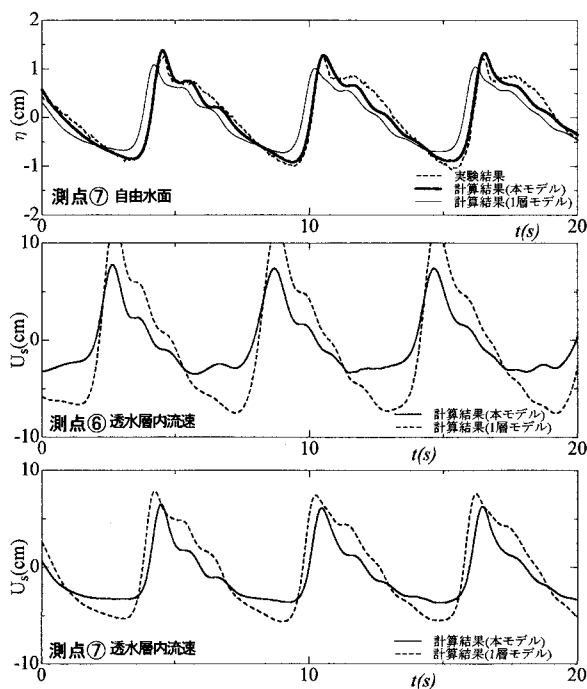


図-6 本モデルおよび一層モデルによる測点7における水位の時系列波形と、測点7および8における透水層内流速の比較

らかなように、1層モデルによって計算された断面平均流速が、本モデルの非線形長波方程式で別途算定した透水層内流速よりも大幅に大きく、結果として透水層によるエネルギー減衰量も過大に計算されたためであると考えられる。以上の比較結果から、本モデルのように非線形長波方程式を別途用いて透水層内における流速を簡易的に算定して透水層による減衰項の算定に用いることによって、透過式潜堤による波高減衰をより精度良く再現できるようになることが分かった。

c) 抵抗係数の算定誤差による数値モデルへの影響

図-3に示したように、実験結果に基づく透水層の抵抗係数には1~2割程度の誤差があった。ここでは、抵抗係数の算定誤差に伴うモデルの計算結果への影響について検証を行う。

図-7に、式(9)に示した抵抗係数を2倍あるいは1/2倍した場合における、本モデルおよび前述の1層モデルによる水位時系列波形の計算値を比較する。図に見られるように、抵抗係数の違いによる計算波形への影響は、本モデルよりも1層モデルの方で大きく、たとえば抵抗係数を0.5倍にした場合のピーク水位の変化量は1層モデルで約27%、本モデルでは14%程度であった。また、本モデルによる計算結果では、抵抗係数の違いに伴う波谷水位の変化はあまり顕著に見られなかった。以上より、本モデルでは抵抗係数の算定誤差による再現計算結果への影響が比較的小さいと考えられる。これは、たとえば抵抗係数が大きくなれば、非線形長波方程式によって計算される透水層内の流速が相対的に小さくなり、透水層内流速が相対的に小さくなることによって、抵抗係数の増加に伴うエネルギー減衰量の増加が抑制されるといった効果があるためであると考えられる。

(4) 潜堤による消波効果

最後に、透過式および不透式潜堤条件における実験結果および本モデルによる計算結果を比較し、透過式潜堤による非碎波波浪の波高低減効果を検証する。

図-8(a)に不透式潜堤の実験条件に対する測点8で

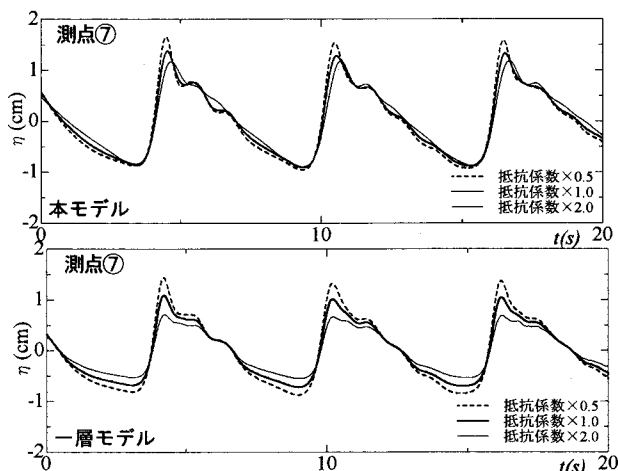


図-7 本モデルおよび一層モデルにおいて抵抗係数を変化させた場合の測点7における水位波形の計算結果の比較

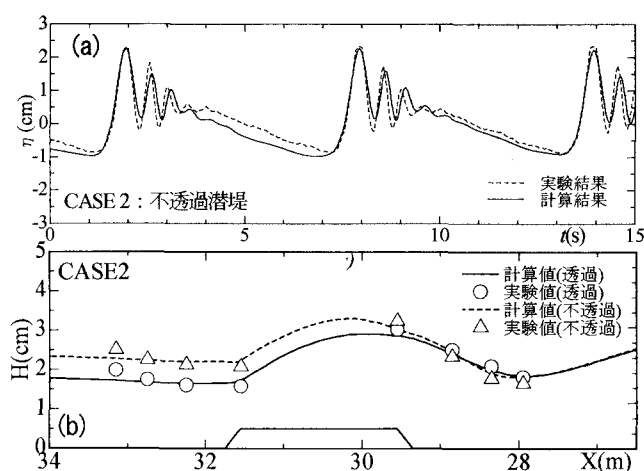


図-8 不透過潜堤条件における測点8での水位の時系列波形と、不透過・透過式潜堤前後における自乗平均波高の比較

の水位の時系列波形の実測値と本モデルで潜堤部の空隙率をゼロとした従来の修正Boussinesq方程式⁴⁾による計算結果とを比較する。数値モデルによる時系列波形では、分裂波形の変動がいくぶん小さく計算されたものの、全体的に良好な再現結果が得られている。

また、透過式潜堤と不透過式潜堤において同じ入射波条件(CASE2)における岸沖方向の波高分布を図-8(b)に示す。図より、潜堤沖側における自乗平均波高の分布は透過式あるいは不透過式潜堤による大きな違いは見られなかった。このことから、潜堤による来襲波の反射率は、透過式および不透過式潜堤でほぼ同じであったことが推察される。一方、潜堤上から岸側にかけては、透過式潜堤条件における自乗平均波高は、不透過式潜堤条件におけるそれに比べて次第に減衰していき、潜堤背後域では透過式潜堤条件における波高が不透過式潜堤条件における波高に比べ5mm程度小さくなった。また、このときの計算結果による波高伝達率は、不透過式潜堤で0.90、透過式潜堤で0.72であった。以上の結果から、潜堤の設置によって長周期波の低減を図る場合には、不透過式潜堤では透過波が大きいために、あまり効果的ではないと考えられる。一方で、透過式潜堤では透水層内を通過する流速によるエネルギー減衰が起こり、とりわけ港内では反射波が潜堤上を何度も通過することになるため、港内の長周期波対策としてある程度の効果が期待できる。

4. おわりに

透過層を有する条件における波浪減衰効果の算定手法として、透過層を考慮した一層のBoussinesq方程式に、透水層内における流速を別途簡易的に算定して、透水層による減衰効果を算定する数値モデルを構築した。構築したモデルを断面二次元水槽における波浪実験に適用し、計算結果と実験結果との比較を通じてモデルの妥当性を確かめた。また、潜堤による非砕波波浪の低減効果と港内における潜堤による波浪制御の適用性について検討した。構築したモデルでは、レイノルズ数に応じて変化する抵抗係数を用いているので、実スケールへの適用性についても期待できるが、その妥当性の検証については今後の課題である。

参考文献

- 磯部雅彦, 芝和彦, Cruz, C.E., 渡辺晃: 透過潜堤による非線形波浪変形について, 海岸工学論文集, 第38巻, pp.551-555.
- 喜岡渉, 甲斐宏典, 平岡慎司: 透水層上の長波方程式と透過潜堤への適用性について, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.711-715, 1994.
- Madsen, P.A., Sorensen, O.R., Schaffer, H.A.: Surf zone dynamics simulated by a boussinesq type model. Part I. Model description and cross-shore motion of regular waves, Coastal Eng., 32, pp.255-287, 1997.
- Madsen, P.A., Sorensen, O.R.: A new form of boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part2. A slowly-varying bathymetry, Coastal Eng., 18, pp.183-204.
- 平山克也: プシネスクモデルにおける透水層内の波浪減衰を考慮した任意反射境界処理法の開発, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.26-30, 2001.
- 鹿島遼一, 長谷川寛: 消波ブロックによる放水口減勢工の抵抗係数について—実規模テトラポッドの抵抗係数, 海洋開発論文集, 第19巻, pp.535-540, 2003.
- Sollitt, C.K., Cross, R.H.: Wave transmission through permeable breakwaters, Proc. 13th Int. Conf. on Coast. Eng., pp.1827-1846, 1972.
- 鄭培喜, 余錫平, 磯部雅彦: Boussinesq方程式に対する高次数値計算モデルの開発, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.21-25, 1998.