バー型海浜における不規則波の変形計算モデル

名古屋工業大学　学生員　○　柏原謙爾
名古屋工業大学　正会員　　喜岡　渉

1．はじめに　砕波点近傍の非線形性の増加や波浪成分の非線形干渉の効果は従来の線形理論に基づく解析手法では十分に表現することができないので，非線形性を考慮した手法による解析が必要である．Boussinesq 方程式は非線形性，分散性を低次ではあるが同時に考慮しており浅海域の波動場の評価に有効であるとされる．さらに，Boussinesq 方程式は時間発展型の方程式であり入射波の不規則性が考慮できるという利点を有する．しかし，本来の Boussinesq 方程式では砕波減衰は考慮されておらず適用範囲が砕波を含まない領域に限定されていた．近年 Boussinesq 方程式の運動量方程式に補正項を付加することで砕波減衰を考慮し，砕波帯を含む波動場への適用を可能にした解析モデルがいくつか提案されている (例えば，Karambas・Koutitas, 1992；Schäffer et al., 1993)．本研究では，その一つである Karambas・Koutitas の砕波減衰モデルに基づき，バー型海浜など任意断面の海浜に対し砕波帯を含む海浜領域に適用できる不規則波浪変形計算モデルの開発を試みる．なお，数値計算には空間方向に対し有限要素法を使用することにより，効率よく数値解析精度を向上させることを試みた．

2．解析モデル　沿岸方向には一様であると仮定し，岸沖方向 1 次元問題として取り扱うこととする．時間を t とし，x 軸は静水面と一致させ波の進行方向にとる．支配方程式は，任意水深における Boussinesq 方程式 (Peregrine, 1967) に対し砕波減衰と底面摩擦減衰の運動量補正項を付加した次の式 (1)，(2) である．

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\{(h+\zeta)u\} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + g\frac{\partial \zeta}{\partial x} = \frac{1}{2}h\frac{\partial^3}{\partial x^2 \partial t}(hu) - \frac{1}{6}h^2\frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} - g\frac{u\mid u\mid}{C^2(h+\zeta)} + \nu_T\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \tag{2}$$

ここに，ζ は静水面からの水位変動，h は静水深，u は水深平均の水平方向流速，g は重力加速度，C は Chezy 係数，ν_T は渦動粘性係数とする．砕波減衰に対する運動量補正項の導入法は粘性項的導入と摩擦項的導入の2通りに大別されるが，どちらがより妥当な方法であるかについては現在のところ明らかでない．ここでは前者により砕波減衰の影響を考慮する．渦動粘性係数 ν_T については，Karambas et al. (1992) に従い，bore model によるエネルギー逸散と Prandtl の混合距離理論による乱流拡散の渦動粘性係数の和として算定する．

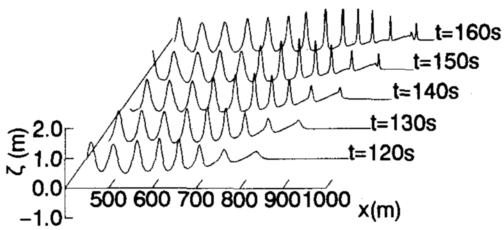
砕波のモデル化では砕波減衰の評価法とともに砕波点の決定が問題となる．本研究では，予備計算によって合田の砕波指標から海底勾配と砕波限界での空間波形勾配との対応表を作成し，これに準じて砕波・非砕波の区別を行うこととする．

入射波は TMA スペクトル (Bouws et al., 1985) を用いて沖側境界より水位変動，水深平均流速の不規則波列で与える．TMA スペクトルは，来襲波の浅水変形その他の影響を水深のみに依存する形状補正関数に抱含し，JONSWAP スペクトル に乗じるもので，簡便な取り扱いで浅水補正を可能としている．なお，海底地形の変動を考慮した場合沖向きに反射波が発生するため，沖側境界では不規則波の入射と同時に長波の自由透過条件を用いて反射波については自由透過させている．

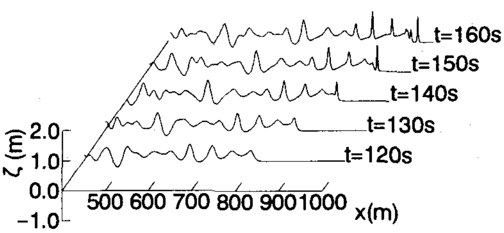
3．数値解析法　差分法による解析では，支配方程式の高階微分項までの計算精度を維持するためには複雑なアルゴリズムが必要となる．これに対し有限要素法では，重み付き残差法による定式化の過程で支配方程式の階数が減少し，高階微分項のアルゴリズムが比較的容易になる．本研究では，空間方向への離散化に際し要素形状は 1 次元シンプレックス要素とし，Galerkin 法を用いて定式化をする．さらに，時間方向には Crank-Nicolson 公式を用い離散化し時間積分を行うこととする．

重み付き残差法による定式化では，分散項が移流項的に取り込まれるため移流項に対して精度の高い計算手法が必要とされる．移流項の高精度計算には一般に非線形要素の導入などがなされるが，これと同等の効果が時間積分の高精度化で得られることが知られている．また，1次元の計算では質量行列の band 幅が高々3と小さく，平面2次元での計算で行われるような質量行列の集中化による時間積分の陽的解法では解が不安定となり易い．そこで本研究では陰的解法を行い，さらに予測子・修正子法により時間積分の精度を向上させることとした．3行対角行列については高速の計算手法が開発されているため，陰的解法によっても効率はさほど低下しない．予測・修正は連続式，運動量方程式間の時間に対する整合性を考慮し，各計算行程で両式間で互いに計算値を交換させながら前進させた．修正回数については，1回で十分な精度が得られることが予備計算によって確認されている．

4．計算結果および考察　ここではステップ型海浜に対し，現地スケールの条件を想定して行った波の伝播変形の計算結果を示す．斜面部の勾配は一様に 0.01 とし，沖側には水深 5.0 m，長さ 500 m，岸側には水深 1.0 m，長さ 100 m の一定水深部を設けた．なお，このケースでは岸側境界には長波の自由透過条件を用いている．図－1 は，沖側境界より波高 1.0 m，周期 8.0 s の正弦波を入射させた場合の計算開始 120 s 後から 10 s 毎の水位変動の空間波形である．x = 500 m から 900 m の範囲が一様勾配斜面部に相当するが，波が伝播し斜面を進行するとともに波形の前傾化が生じており，さらに，波峰間隔が減少，波高が増大しており，浅水変形が再現されていることがわかる．また，図－2 は有義波高と周期をそれぞれ 1.0 m，8.0 s とし TMA スペクトルにより入射波を発生させた場合の水位変動の空間波形である．不規則波においても浅水変形が再現されている．また，規則波および不規則波の計算結果には差分解法で生じるような著しい平均水深の低下 (Abbott et al., 1984) は見られず，長時間の計算に対しても安定である．なお，両計算例とも各要素は要素長 1.0 m の等長要素を使用し時間増分は 0.01 s で計算を行っている．



図－1　規則波の伝播変形



図－2　不規則波の伝播変形

5．おわりに　本研究では，海浜における不規則波の変形計算モデル開発の第1段階として，斜面上の不規則波の伝播変形について解析を行った．砕波減衰をモデルへ取り込んだ計算結果については講演時に報告する．

参考文献

Abbott, M. B., A. D. McCowan and I. R. Warren (1984), J. Hydraulic Eng., Vol .110, pp.1287-1301.

Bouws, E., H. Günther, W. Rosenthal and C. L. Vincent (1985), J. Geophys. Res., Vol. 90, pp.975-986.

Karambas, T. V. and C. Koutitas (1992), Coastal Eng., Vol. 18, pp.1-19.

Peregrine, D. H. (1967), J. Fluid Mech., Vol. 27, part 4, pp.815-827.

Schäffer, H. A., P. A. Madsen and R. Deigaard (1993), Coastal Eng., Vol. 20, pp.185-202.