

安定海浜の形成の数値シミュレーション

山下隆男*・土屋義人**・熊谷隆宏***

1. 緒 言

離岸堤から安定海浜工法へ、海浜を安定化させて海岸侵食を制御するという概念が普及してきた。自然外力に逆らわずに海浜を維持するためには、自然に対するより深い理解が必要となる。

波浪、海浜流、漂砂に関する多くの研究成果をインテグレートし、海浜変形を予測することは海岸工学における最終目標のひとつであり、海浜変形に関するいくつかの数値モデルが発表されてきている。(Watanabe・Maruyama, 1984; de Vriend・Stive, 1987等) 海浜流、海浜変形計算には、複雑な海底地変や人工構造物が存在する海域における屈折、回折、反射、砕波によるエネルギー散逸、流れとの相互作用を記述する波浪の伝播・変形モデルが必須であり、Boussinesq 方程式 (Abbott ら, 1978等) および緩勾配方程式に基づくモデル (Berkhoff, 1972) が普及しているが、radiation stress を基礎とした海浜流モデルには波形変化までは必要が無いことから、流れとの相互作用や砕波、海底摩擦によるエネルギー散逸の効果を導入した緩勾配方程式が広く使われている。

この方程式の数値計算には、差分法による効率的な解法 (楕円型緩勾配方程式を時間発展の双曲型 3 元連立方程式系に変換し有限差分法で定常解を得る方法 (Warren ら, 1985; Copeland, 1985; Madsen・Larsen, 1987 等) が実用化されてきた。これは、複素関数表示の水位変動を求め、緩勾配方程式の伝播関係および wave action の保存則を同時に解く方法であり、線形長波の水位変動の定常解を計算する数値波動解析法、これを線形分散波の計算用に修正し、便宜的に非定常問題に適用する非定常緩勾配方程式による計算と同一である。

一方、多くの海浜流数値モデルは、radiation stress を起動力とした水平 2 次元モデルであり、砕波帯における平均流の鉛直分布特性は直接的には考慮されない。海浜変形モデルは、個々に計算された波浪場、海浜流場から漂砂量を求め、その連続式から海底地形の変動を計算す

るモデルが一般的である。

ここでは、双曲型緩勾配方程式による波浪場を便宜的に非定常問題に適用することとし、海浜流計算には海底勾配の効果を直接取り入れた基礎式を漂砂の連続式と連立させて解くモデルを構築する。

2. 海浜変形数値モデルの概要

(1) 波浪変形モデル

波・流れ共存場の緩勾配方程式: Kirby (1984) によれば、流れとの共存場で wave action E/σ を保存する緩勾配方程式は次式で示される。

$$\frac{D^2\phi}{Dt^2} + (\nabla \cdot \vec{U}) \frac{D\phi}{Dt} - \nabla \cdot (CC_g \nabla \phi) + (\sigma^2 - k^2 CC_g - i\sigma W)\phi = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 ϕ は速度ポテンシャルであり、 D/Dt は物質導関数、 $D/Dt = \partial/\partial t + U_j \partial/\partial x_j$ である。

また、砕波による波浪エネルギー散逸率を評価する方法としては、種々のモデルがあるが概念的にはどれも同じで、波高減衰特性に関しては実験結果との対応は良い。ここでは Izumiya・Horikawa (1984) のモデルを用いる。

さて、波・流れ共存場の水表面での境界条件、振幅変化が位相のそれに比べて緩やかであるという仮定を用いると、緩勾配方程式は複素水位変動 ζ により、次式のように書き換えられる。

$$\left\{ 1 + \frac{\sigma}{\omega} \left(\frac{C_g}{C} - 1 + \frac{i}{\sigma} W \right) \right\} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} + \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot (\vec{U} \zeta)) - \nabla \cdot \left\{ \omega CC_g \nabla \left(\frac{\zeta}{\sigma} \right) \right\} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 W は単位エネルギー強さ当りの散逸量である。また、 ω : 固定座標系からみた角周波数、 σ : 移動座標系から見た角周波数で、次式の関係がある。

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \sigma + \vec{U} \cdot \vec{k}, & \sigma &= \sqrt{gk \tan kh} \\ C &= \frac{\sigma}{k}, & C_g &= \frac{\partial \sigma}{\partial k} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

波と流れの共存場における分散関係、式 (3) は、流速場 $\vec{U}$ のもとで波数 k が決定されるため、近似式による高精度の直接計算法が適用できない。このため、流れ

* 正会員 工修 京都大学助手 防災研究所

** 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

*** 正会員 五洋建設株式会社 土木設計部

との相互作用を考慮しない場合に比べて約2倍の計算時間が必要となる。

双曲型緩勾配方程式系：楕円型緩勾配方程式を1階の3元連立双曲型偏微分方程式系に変換すると、次式のようになる。

$$\frac{\partial P}{\partial t} - i\omega P + \omega CC_g \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{S}{\sigma} \right) = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} - i\omega Q + \omega CC_g \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{S}{\sigma} \right) = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} + \frac{1}{\omega} \left\{ 1 + \frac{\sigma}{\omega} \left(\frac{C_g}{C} - 1 + \frac{i}{\sigma} W \right) \right\} \\ \times \left(\frac{\partial S}{\partial t} - i\omega S \right) + \vec{U} \cdot \vec{r} S = SS \quad \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

ここに、 S , P , Q は調和振動成分を除去した複素水位変動と x および y 方向の複素線流量であり、 SS は造波境界点での波源（吹き出し）項であり、位相 χ , 振幅 a_0 , 空間刻み Δx , Δy , $\Delta s = \Delta x / \cos \theta$ により、次式で与えられる。

$$SS = \frac{C \Delta s}{\Delta x \Delta y} a_0 e^{i\chi} \quad \dots\dots\dots (7)$$

数値計算には、空間スタaggered変数配置で、有限差分法の交互陰解法（ADI法）を適用する。波・流れ共存場では $\vec{U} \cdot \vec{r} S$ （移流項）があるため、係数行列が五重対角行列となる。また、この項に1次の風上差分を適用すると強い数値粘性を生じる。その他、開境界での反射の処理の問題、分散関係式の高速演算化の問題に対して検討を要するため、本研究では流れを考慮した計算は行っていない。

(2) 海浜流・海浜変形モデル

海浜変形、海浜流の相互作用を直接考慮するため、局所的水深変化の影響を陽に含む水平2次元の海浜流の基礎方程式と全水深の時間変化項を入れた漂砂の連続式とを連立させたモデルとした、流れの運動方程式中、水平混合項の表示には、波向きを考慮したものを用いた。また、漂砂量の計算には、波浪の非線形性による水粒子軌道の非対称性、波浪・海浜流相互作用および局所海底勾配の影響について掃流、浮遊漂砂毎の計6成分の和として定式化された Bailard (1982), Stive (1986) による漂砂量則を用いる。以下に、モデル方程式を示す。

x —方向の運動方程式：

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \beta \left(U \frac{\partial M}{\partial x} + V \frac{\partial M}{\partial y} \right) \\ = -gH \left(\frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\partial D}{\partial x} \right) - \frac{1}{\rho} \tau_x^B \\ - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yx}}{\partial y} \right) - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial T_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yx}}{\partial y} \right) \\ \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

ここに、 β は運動量補正係数、 H : 全水深、 M , N およ

び U , V はそれぞれ海浜流の x , y 方向の流量、流速であり、静水深 D の局所的变化 $\partial D / \partial x$ を考慮している。以上の積分平均化された方程式において、海底摩擦 τ_x^B および、radiation stresses S_{ij} 等の表示式は以下のようである。

$$\tau_x^B = \rho C_f \sqrt{U^2 + V^2} U_i \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに、摩擦係数 C_f は $10^{-3} < C_f < 10^{-2}$ の値をとる。

radiation stresses: 反射波が存在するような場合を含めた波浪場では次式のように表される。

$$\begin{aligned} S_{ij} = \frac{\rho g}{4} \left[\operatorname{Re} \left(\frac{\partial \zeta}{\partial x_i} \frac{\partial \zeta^*}{\partial x_j} \right) \frac{1}{k^2} \left(1 + \frac{2kD}{\sinh 2kD} \right) \right. \\ \left. + \delta_{ij} \left\{ |\zeta|^2 \frac{2kD}{\sinh 2kD} + \frac{2kD \coth 2kD - 1}{2k^2} \right. \right. \\ \left. \left. \times \left(\left| \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right|^2 - k^2 |\zeta|^2 \right) \right\} \right] \quad \dots\dots (10) \end{aligned}$$

ここに、 δ_{ij} はクロネッカーデルタ、 $*$ は複素共役を表す。

水平混合項：波向き θ を用いて次式で表示する。

$$\begin{aligned} -T_{yx} = \rho H (\nu_e \sin \theta) \\ \times \left(-\sin \theta \cos \theta \frac{\partial V}{\partial y} + \sin \theta \sin \theta \frac{\partial U}{\partial y} \right. \\ \left. - \cos \theta \cos \theta \frac{\partial V}{\partial x} + \sin \theta \cos \theta \frac{\partial U}{\partial x} \right) \\ \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

ここに、 ν_e : 渦動粘性係数で、渦の速度スケールが長波の波速 $\sqrt{g(\eta+D)}$ と同程度、長さスケールは汀線からの距離 x に比例させて与える。

漂砂の連続式：海浜の局所的变化を考慮して、全水深 D の時間変化と漂砂の局所勾配との釣合として、次式で表される。

$$\frac{\partial D}{\partial t} = \frac{\partial q_i}{\partial x_i} \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 q_i は、単位幅水柱、単位時間当りの全漂砂量で、以下の漂砂量式を用いる。

漂砂量則：Bailard (1982) によりまとめられ、Stive (1986) によって海浜変形モデルへ適用された漂砂量式で、波浪の非線形性による水粒子軌道の非対称性（サフィックス as ）、波浪・海浜流相互作用（ nc ）および局所海底勾配の影響（ sl ）について掃流（ b ）、浮遊（ s ）漂砂ごとの計6成分の和として、次式のように定式化される。

$$\vec{q} = \frac{\vec{q}_{asb} + \vec{q}_{ass} + \vec{q}_{ncb} + \vec{q}_{ncs} - \vec{q}_{slb} - \vec{q}_{sls}}{(\rho_s - \rho)g(1 - \lambda)} \quad \dots\dots (13)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} \vec{q}_{asb} &= \frac{9B_0 u_{orb}^4 \cos \phi_2}{C \sinh^2(kD)} \vec{i}, & \vec{q}_{ass} &= \frac{9B_0 u_{orb}^5 \cos \phi_2}{5\pi C \sinh^2(kD)} \vec{i} \\ \vec{q}_{ncb} &= \frac{3B_0 u_{orb}^2 \vec{U}}{2}, & \vec{q}_{ncs} &= 6.4 B_0 u_{orb}^3 \vec{U} \\ \vec{q}_{slb} &= \frac{1.6 B_0 u_{orb}^3}{\tan \phi} \frac{\partial D}{\partial x} \vec{i}, & \vec{q}_{sls} &= \frac{8\epsilon_s B_0 u_{orb}^5}{w_f} \frac{\partial D}{\partial x} \vec{i} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (14)$$

以上の式中、 $\vec{i}$ は単位ベクトル、 θ は波向き、 u_{orb} : 線形波の底面近傍での流速振幅、 $\vec{U}$: 平均流の底面近傍流速、 ϕ_2 : Stokes 波理論の 2 次高調成分波との位相遅れ角、 C : 線形分散関係で与えられる波速、 $\varepsilon_s=0.02$ 、 ρ_s 、 ρ : 海水、底質の密度、 g : 重力加速度、 λ : 底質の間隙率、 w_f : 沈降速度および k : 波数であり、 B_b および B_s はそれぞれ、掃流漂砂および浮遊漂砂にかかわる係数である。

以上の海浜流・海浜変形の基礎式も、波浪変形モデルと同様、ADI 法により数値計算し、海浜変形計算の数十ステップ毎に波浪計算を更新する。

3. 安定海浜の形成過程の数値計算

(1) 養浜直後の波浪・海浜流場

わが国の侵食海岸に多く見られるように、鉛直護岸前面には砂浜がなく、法先水深が急に深くなってしまった海岸に安定海浜工法を施行する場合を想定し、モデル地形上に養浜およびヘッドランドを施行した後の海浜変形を計算する。すなわち、図-1 に示すように、鉛直護岸の前面から沖に 280 m までは 6 m の一様水深で、それより沖側では海底勾配約 1/100 の一様な傾斜海浜のモデル海浜上に、鉛直護岸から 70 m までに砂浜を造成し、それより沖 140 m までは約 1/23 の一様勾配の砂浜を養浜する。ヘッドランド長は回折波の発生に寄与する側が 150 m、反対側は養浜砂の流失防止用で 50 m とし、両端部には突堤を設置する。

まず、汀線変化の長期予測を行う必要ため、波浪変形モデルと 1 ラインモデルとから海浜変形の代表波浪に対する最終汀線形状（安定平面形状）を計算し、その後の地形に対して海浜流・海浜変形計算を行う。

海浜変形に支配的な波浪条件として入射角 8° 、周期 8 s、沖波波高 2 m の波浪を設定する。波浪変形計算の空間刻み Δx は 1 波長内に格子点が 8 点以上有ることが望ましく、最小でも 4 点は必要であるため、 $\Delta x=5$ m、時間刻みは Courant 数が 1 になるよう設定する。また、海

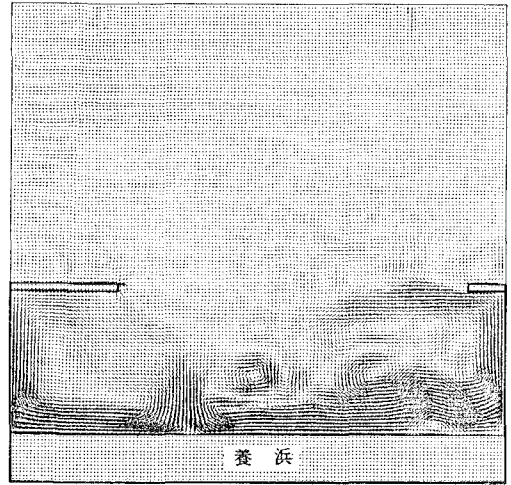


図-2 養浜直後の海浜流の計算結果

浜流・海浜変形計算でも、波浪計算と同一の空間刻みを設定した。境界条件は、波浪変形計算には、反射により計算が乱されないよう、ヘッドランド、突堤、汀線、側方において無反射境界条件、沖側に造波境界を設定し、海浜流、海浜変形計算では完全反射条件とした。図-2 に海浜流の計算結果を示す。流速ベクトルのスケールは、格子点間隔が 0.5 m/s の流速である。

(2) 汀線変化の計算

さて、養浜した人工海浜がどの程度 pocket beach 内に残るのかという問題は極めて重要である。長期的観点から、1 ラインモデルと緩勾配方程式による波浪変形モデルにより海浜の平面的な安定形状を計算する。

図-3 は安定海浜に至るまでの汀線変化（養浜時の汀線からの変動）および最終汀線から仮定される海底地形の 3D 表示である。計算は波高 2 m、周期 8 s の波浪が 100 days 来襲したと仮定した。汀線の時間的变化としては、10 days 毎の結果を出力し、平衡状態に漸近していく様子を示した。ここで、100 days は、直江津港での波浪観測の結果から、有義波高 2 m 以上の波浪の作用時間は年間約 1060 hrs (44.2 days/yr) であることから、約 2.3 yrs 後の地形であると考えられる。

(3) 安定海浜の地形モデル

Pocket beach の 3 次元的地形特性はさほど究明されていないので、ここでは海浜の平面、断面特性から、安定海浜の 3 次元地形の再現を、以下のように行う。

まず、Hsu ら (1987) によりオーストラリアの 14 の pocket beaches の汀線形状から定式化された、次式で示す安定海浜の汀線位置と headland の長さを決める。次に、漂砂の移動限界水深 h_k から沖側の位置を決め、両側方境界を設定することで、安定海浜の平面形状を決める。

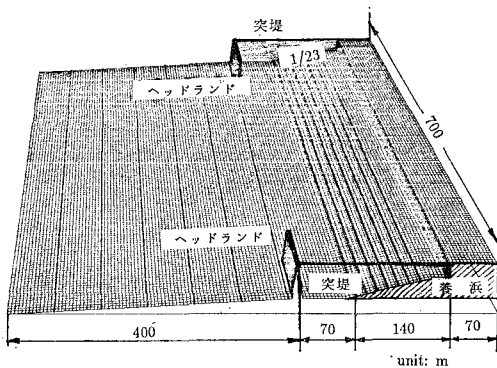
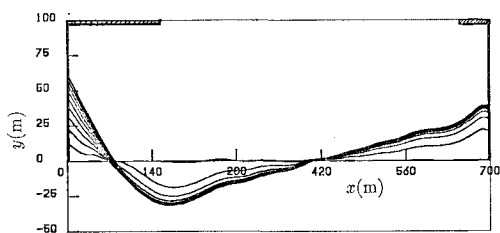
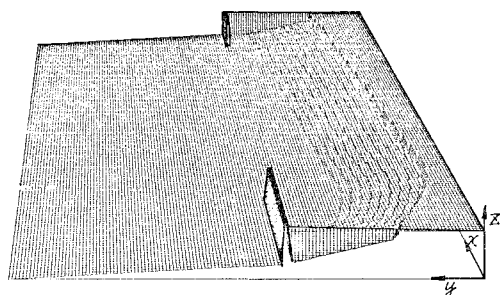


図-1 モデル化した海底地形と養浜地形



(a) 汀線変化



(b) 海浜の形状

図-3 1ラインモデルによる安定海浜に至るまでの汀線変化および海浜形状

$$\frac{R}{R_0} = C_0 + C_1 \left(\frac{\beta}{\theta} \right) + C_2 \left(\frac{\beta}{\theta} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (14)$$

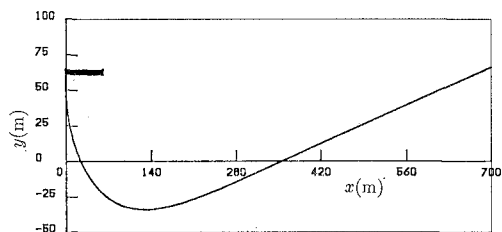
ここに、 β は入射角、 θ は入射波の波峰線と任意の汀線位置と回折波の発生点とを結ぶ線とのなす角、係数 C_0 、 C_1 、 C_2 は β により変化する。

次に、平衡海浜断面形状として Dean (1981) の平衡海浜断面形状を考え、平面形状の汀線と移動限界水深の間では平衡海浜断面形状が形成されていると仮定すると安定海浜の3次元地形がモデル化でき、図-4 に汀線形状と150 hr (6.25 days) 後の海浜流、海浜変形の計算結果を示す。この図は図-3の安定海浜工法のヘッドランド内に無限に土砂を投入できるとすると、最終的にはこのような安定な海浜になることを示すものである。図では、安定海浜内では顕著な沿岸流は発生しておらず、ヘッドランド背後での大きな循環流とそれを補償する反流の他、局所的で小さい循環流が形成され、海浜の形は小さく、碎波点でのバー地形とヘッドランド背後のshoalの形成が見られる。

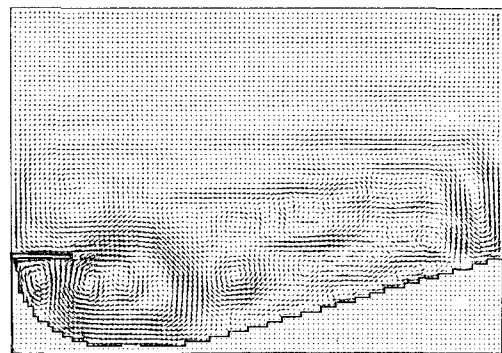
(4) 安定海浜形成後の波浪・海浜流・海浜変形計算

1ラインモデルにより安定海浜造成後の汀線形状が得られたので、この海底地形の海浜変形を計算する。すなわち、図-3の海底地形において波浪変形、海浜流計算を行うと図-5の結果が得られる。なお、計算手法、ベクトルのスケールは前出と同一である。

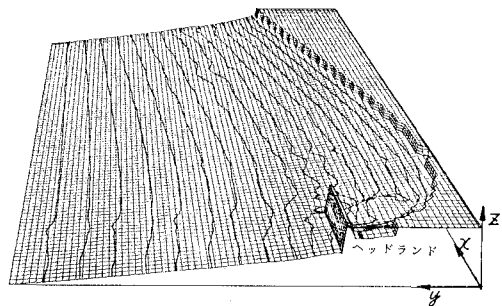
これらの図より、1ラインモデルにより得られた安定海浜における波浪、海浜流特性として、安定海浜形状に近い海浜地形で計算された海浜流系は、図-2に示した



(a) 汀線



(b) 海浜流



(c) 海浜形状

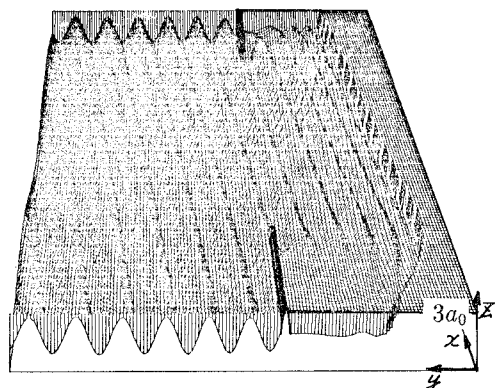
図-4 安定海浜の3次元地形モデルによる汀線形状と海浜流、海浜変形の計算結果

それと比較して、沿岸流の発生が抑えられ、ヘッドランド背後に形成される大きな循環流を補う小さい循環流群が歯車のように形成されていることがわかる。また、ヘッドランド背後の大きな循環流とそれを補う循環流のペア、合計4つの循環流セルが形成されている。

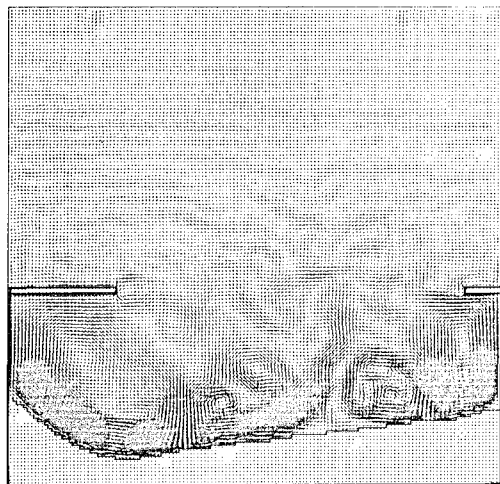
さらに、海浜流および海浜変形の相互作用を考慮した3次元海浜変形計算を、計算時間を短縮するために漂砂量則を100倍して、約10 min間の計算を行い、図-6の結果を得た。対象とした計算時間が短いため(約16.6 hrsに相当)、断定できないが、ヘッドランド内から養浜砂が多量に流失する可能性はないようである。

4. 結 語

以上、緩勾配方程式による波浪変形モデル、海浜変形との相互作用を考慮した水平2次元海浜流モデル、海浜



(a) 波 形



(b) 海 波 流

図-5 1ラインモデルにより得られた安定海浜における波浪, 海浜流の計算結果

変形モデルおよび1ラインモデルを用いて, 安定海浜工法内での養浜砂の変形の数値シミュレーションを行った。さらに, 安定海浜の平面, 断面特性から再現した安定海浜の地形モデルを提案し, そこでの海浜変形計算を行った。これにより, 安定海浜工法内の養浜砂流失は少ないと推定されたが, さらに長期にわたる海浜変形の数値予測, 流れとの相互作用を考慮した波浪変形計算の他, 安定海浜施工後のモニタリング, 現地実験による数値モデル検証を通して, 数値モデルの向上を図りたい。

最後に, 本研究を遂行するにあたり多大の御協力を賜った新潟県土木部河川課の関係諸官に謝意を表す。また, 本研究は文部省科学研究費, 試験研究B(研究代表者: 土屋義人, No. 01850121)の研究成果の一部である。

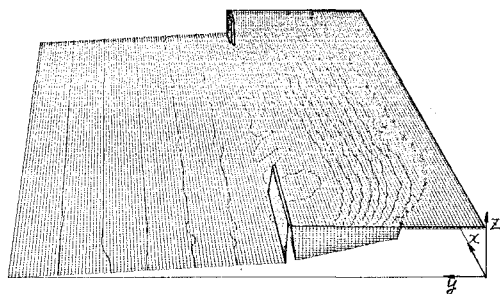


図-6 1ラインモデルにより得られた安定海浜における海浜変形の計算結果

参 考 文 献

- Abbott, M. B., H. M. Petersen and O. Skovgaard (1978): On the numerical modelling of short waves in shallow water, Jour. Hydraulic Res., Vol. 16, No. 3, pp. 173-204.
- Bailard, J. A. (1982): Modelling on-offshore sediment transport in the surf zone, Proc. 18th ICCE, pp. 1419-1438.
- Berkhoff, J. C. W. (1972): Computations of combined refraction-diffraction, Proc. 13th Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 471-490.
- de Vriend, H. J. and M. J. F. Stive (1987): Quasi-3D modelling of nearshore currents, Coastal Engineering, Vol. 11, No. 5/6, pp. 565-601.
- Dean, R. O. (1981): Equilibrium beach profiles, U.S. Atlantic and Gulf Coasts, Ocean Eng. Rep. No. 12, University of Delaware.
- Hsu, J. R. C., R. Silvester and Y. M. Xia (1987): New characteristics of equilibrium bays, Proc. 8th Australian Conf. on Coastal and Ocean Eng., pp. 140-144.
- Ito, Y. and K. Tanimoto (1972): A method of numerical analysis of wave propagation, application to wave diffraction and refraction, Proc. 13th Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 503-522.
- Izumiya, T. and K. Horikawa (1984): Wave energy equation applicable in and outside the surf zone, Coastal Eng. in Japan, Vol. 27, pp. 119-137.
- Kirby, J. T. (1984): A note on linear surface wave current interaction over slowly varying topography, Jour. Geophy. Res., Vol. 89, C1, pp. 745-747.
- Madsen, P. A. and J. Larsen (1987): An efficient finite difference approach to the mild slope equation, Coastal Engineering, Vol. 11, pp. 329-351.
- Stive, M. J. F. (1986): A model for cross-shore sediment transport, Proc. 20th ICCE, pp. 1551-1564.
- Warren, I. R., J. Larsen and P. A. Madsen (1985): Application of short wave numerical models to harbour design and future development of the model, Int. Conf. on Numerical and Hydraulic Modelling of Ports and Harbours, Birmingham, pp. 303-308.
- Watanabe, A. and Y. Maruyama (1984): Numerical analysis of combined refraction diffraction and breaking, Proc. of 31th Japanese Conf. on Coastal Eng., pp. 103-107.