

海浜流の再現性に関する研究

Reproduction of nearshore current-comparison of numerical analysis with experiment.

建設省土木研究所	正会員	橋本 宏
○ 同上	同上	宇多高明
同上	同上	林 敏夫

1. まえがき

平坦な砂浜海岸に波が入射すると離岸流や沿岸流などの海浜流が発生するが、この流れは砕波帯における物質の拡散や海浜地形変化に重要な役割を有することが知られている。このような海浜流に関する研究は益々盛んになりつつあるが、これらの自然海浜における現象解明とは別に、浅海における人工構造物の構築に伴う流況変化や海浜変形の予測も重要な問題である。

特に、レクリエーション上の機能や海岸侵食の防止から、人工的に砂を供給する養浜事業が脚光を浴びているが、養浜は単に砂の供給に止まらず、各種構造物と組合せて砂の流出防止を図ることが多い。しかしこれら各種の構造物の配置形状とそのもたらす効果についての検討は充分には行われてはいない。

ところで、著者ら¹⁾はすでに自然海浜や構造物（離岸堤）周辺における海浜流を計算する方法を明らかにしたが、その際にはモデルの実験的検証を行うことができなかった。本論文では、以上の点を考慮して構造物による養浜効果を固定床平面実験によって調べるとともに、測定された構造物周辺の流況に関して数値計算との比較を試み、モデルの妥当性について検討した。この結果、計算による再現性はかなり良好であることが判明し、海浜流計算モデルの妥当性が確認された。

2. 実験方法

実験は鹿島試験所の幅 30m、長さ 25m の平面水槽を用い、波の諸元、水深、海底勾配等の実験条件を一定とし、海岸構造物の種類と設置状態を変えて行った。実験条件として波高は 6.5 cm、周期は 1.2 秒、水深（平坦部）は 35 cm、海底勾配は 1/20 とした。使用した構造物は潜堤、突堤、離岸堤である。海岸構造物のうち潜堤は汀線と平行に設置し、材料は 3 号碎石を用いた。離岸堤は潜堤と同様に汀線と平行に設置するが、天端は波が越えない高さとした。離岸堤本体は厚さ 10cm のコンクリートブロック積み直壁とし、沖側には反射消しとして 3 号碎石を 1/3 の勾配で設置した。突堤は汀線と直角方向に設置し、厚さ約 5 cm のモルタル製の直壁とし、高さは越波しない程度とした。

測定は、波高、水位及び流況について行った。まず波高については 10 台の階段抵抗式波高計を用いて 1 ケースにつき 50 点ずつ 50cm 間隔で測定した。次に水位はピトー管によって測定地点の静水圧をマンオメータに取り出して測定した。測定は精度を上げるためにマンオメータの傾斜角を 30 度にして実際の水位変化の 2 倍の値まで読めるようにした。測定点数は 1 ケース当たり約 25 点とした。流況はフロートを投入してその移動状況を写真撮影して求めた。フロートとしては小さなポリビンのふた（直径 3 cm）を用いた。撮影は測定範囲が広い場合は模型上空約 15m にモータードライブカメラを吊した気球を上げて行い、一方範囲の狭い場合はローリングタワーと脚立を利用した。撮影はフロート投入後 2.4 秒に一枚の割合で行った。更に拡散状況を調べるためにフローレッセンの拡がりも同様な方法によって調べた。最後に、波向測定についてはスケッチと写真撮影によって行った。

3. 解析方法

解析の基礎となる方程式は、汀線方向に x 軸、これと直角方向に y 軸をとり、各々の方向の流量を M, N 、更に静水面より鉛直上方を正にとった水位 η を用いて表わせば式(1)～(5)となる。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{2M}{H} \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{N}{H} \frac{\partial M}{\partial y} + \frac{M}{H} \frac{\partial N}{\partial y} = -g(h+\eta) \frac{\partial \eta}{\partial x} - r_b U_0 U + L V^2 M - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{M}{H} \frac{\partial N}{\partial x} + \frac{N}{H} \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{2N}{H} \frac{\partial N}{\partial y} = -g(h+\eta) \frac{\partial \eta}{\partial y} - r_b U_0 V + L V^2 N - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{ただし, } S_{xx} &= E \{ C_g / C \cdot (1 + \cos^2 \theta) - 1/2 \} \\ S_{xy} &= E C_g / C \cdot \sin \theta \cos \theta \\ S_{yy} &= E \{ C_g / C \cdot (1 + \sin^2 \theta) - 1/2 \} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$M = UH = U(h + \eta), \quad N = VH = V(h + \eta) \quad (5)$$

ここに、 h ：水深、 E ：波のエネルギー、 C_g ：群速度、 r_b ：底面摩擦係数、 L ：水平方向渦動粘性係数、 θ ：入射角、 U_0 ：波による底面水平速度成分であり、 S_{xx} 、 S_{xy} 、 S_{yy} は radiation stress を示す。

計算は差分法 (ADI) を用いて式(1)~(3)より差分式を作って行う。ただし差分方程式や変数配置等については文献 1) に詳述してあるのでここでは省略する。

また、運動方程式の各項の重要度を判定するために、各項の値の空間分布を求めた。

4. 計算条件

表-1 計算条件

計算に際しては radiation stress を計算するために、一定間隔 (4S) で分割されたすべての格子点で波高、波向、水深を与える必要がある。これらのデータのうち水深データは簡単に与えられるが、構造物周辺の波高及び波向の計算法については確立した方法が存在しないので、流況の再現性を問う上では、まず実験による波高及び波向の値を用いて流況の比較を行うことにした。このため波高分布は格子間隔と合せてかなり細かに測定する必要があるが、実験では 50cm 間隔で測定を行った。ただし計算は更に細かい 25cm メッシュを用いることとし、実験値の存在しない点では補間法によって求めた。

実験ケース	格子の大きさ	構造物の種類	突堤間隔	摘要
No 1	34 × 26	潜堤	—	—
No 2	14 × 22	潜堤+突堤	3 m	T 字型配置
No 3	18 × 22	潜堤+突堤	4	T 字型配置
No 4	18 × 22	離岸堤+突堤	4	T 字型配置
No 5	18 × 22	離岸堤+突堤	4	開口部に離岸堤
No 6	18 × 22	離岸堤+突堤	4	T 字型配置

次に、水平方向渦動粘性係数は Longuet-Higgins²⁾ にしたがって式(6)のように与えた。

$$L = N \times \sqrt{gh} \quad (6)$$

ただし係数 N は 0.01 とした。また摩擦係数については、 $r_b = 0.00637$ とおいた。

境界条件は、海岸や構造物によって流れが阻止される場所では流量を 0 とおいた。また計算時間間隔 (Δt) はすべて 0.1 秒とした。なお、実験と計算の比較を行った多数のケースのうち、ここでは表-1 に示されるような代表例についてのみ述べることにする。

5. 実験と計算の比較

5.1 潜堤の場合 (No 1)

最初に潜堤のみの実験を行った。実験では潜堤幅と長さを各々、0.1、0.5、1m 及び、1、2、3、4 m と変えたが、これらのうち幅 0.1m のときは堤の内外ではほとんど波高変化は存在せず、消波効果は極めて弱かった。一方、天端幅を 1 m とした場合は相当の波高減殺効果があり、極めて特長的なパターンを示した。このためこの場合について詳しく調べることにした。

さて、図-1 は水深 20 cm の地点に設置した潜堤 (幅 1 m、長さ 3 m、天端水深 0.1 m) の回りの波高分布を示したものである。ただし図中の格子点及びカッコ内の数字は cm 単位の波高分布を示し、また破線は波向を

表わしている。潜堤背後の(4^m, 2^m)付近では波高は開口部の値の約半分になっている。またこの場合の流況を示したのが図-2である。ただし図中の数字は2.4秒おきに定めたフロートの位置の変化の順序を示しており、格子間隔との対比から移動距離を求め、それを経過

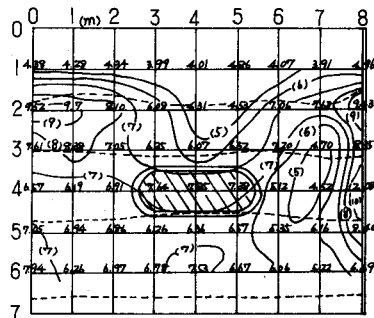


図-1 波高分布 (No. 1, 潜堤)

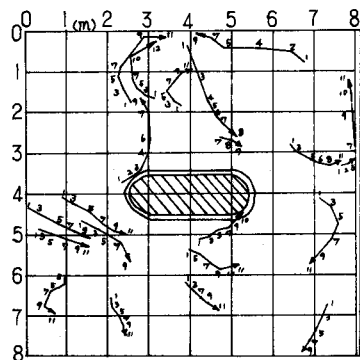


図-2 流況図 (No. 1, 実験)

時間で割れば平均速度となる。以後の実験によるすべての流況図はこの定義にしたがって整理してある。図-2によれば潜堤の背後の岸寄りに内側へ回り込む向きに二つの循環流が発生しており、またそれらとは別に潜堤上を越えた水が外側へ流出する向きにも弱い循環流が見られる。

この状況は、数値計算による流況を示す図-3を見ると更に明らかである。実験との比較は実験の場合の測定点が少ないことなどから必ずしも精度が高いとは言えないが、循環流発生的基本的パターンと代表流速はかなり良く対応していると考えられる。

ところで、このような流況によって、①岸側の循環流によって底質が沿岸方向から堤背後部へ集められ、また、②堤を越える流れにより浮遊した底質が堤内へ運ばれる一方、堤内の静穏な条件により堤内での沈殿が促進される、という二条件より、堤背後にはトンボロの形成が促されると考えられる。しかし斜め入射による沿岸流が卓越する場合は背後の底質が沿岸方向に動かされることも予想されよう。

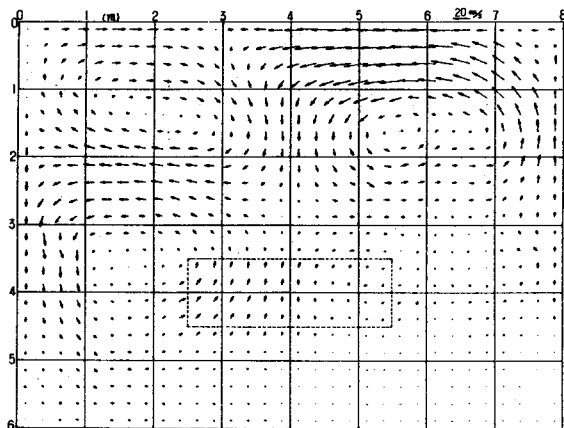


図-3 流況図 (No. 1, 計算)

ところで、このような流況によって、①岸側の循環流によって底質が沿岸方向から堤背後部へ集められ、また、②堤を越える流れにより浮遊した底質が堤内へ運ばれる一方、堤内の静穏な条件により堤内での沈殿が促進される、という二条件より、堤背後にはトンボロの形成が促されると考えられる。しかし斜め入射による沿岸流が卓越する場合は背後の底質が沿岸方向に動かされることも予想されよう。

5.2 潜堤と突堤の組合せ (No. 2, 3)

突堤はその間隔を2, 3, 4mと3通り変え、これに合せて潜堤の開口幅は1, 2, 3mとした。ただしここで用いた潜堤は長さが1m, 天端幅が0.1m, 天端における水深が5cmのものである。

まず、図-4と5は突堤間隔が3mと4mの場合の波高分布を示す。これらによれば潜堤幅が0.1mと狭いために潜堤による波高減衰はそれほど顕著ではない。また図中破線で示されている波峰線は図-4では左上りの線となっており、一方図-5では右上りになっている。これらに対応する流況は実験値が図-6, 7に、計算値が図-8, 9に示されている。図-6では時計回りの循環流が、また図-7では反時計回りの循環流が発生している。これは図-4と5に示されるように碎波帯付近の入射角の相違によるものである。

実験と計算の比較については、まず図-6と8を比較すると実験では循環流の中心が(2^m, 1^m)付近にあり、また左側の潜堤から右側の突堤のつけ根方向へ直線的に流れている。一方計算では循環流の中心が(1.5^m, 1.75^m)付近にあり、堤内にはあるものの沖側へずれている。また実験では循環流が潜堤の内部に閉じ込められているのに対して、計算では潜堤上及び堤外にもかなり強い流れが発生している。この相違の原因としては潜堤による海底形状変化を十分に計算上でモデル化できなかったことや、測定上の誤差、更に渦動粘

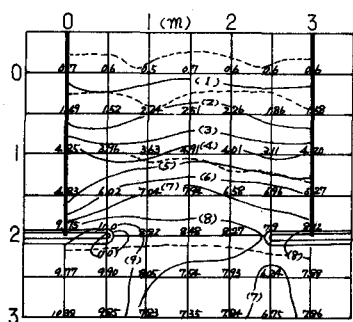


図-4 波高分布 (No.2 潜堤+突堤)

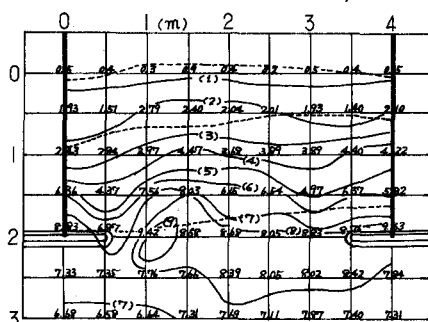


図-5 波高分布 (No.3 潜堤+突堤)

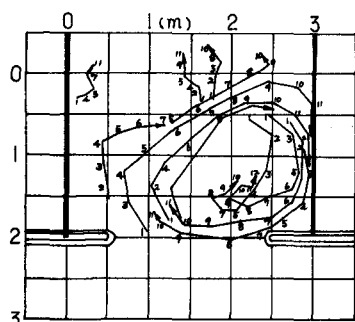


図-6 流況図 (No.2 実験)

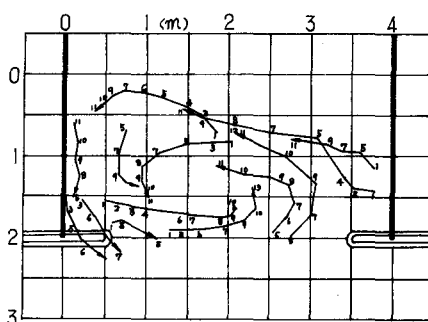


図-7 流況図 (No.3 実験)

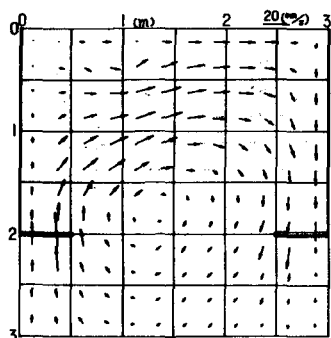


図-8 流況図 (No.2 計算)

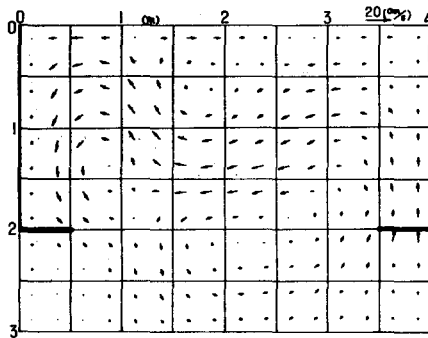


図-9 流況図 (No.3 計算)

性係数等の見積りに問題があったためであろうと考えられる。

しかし計算においても、潜堤～突堤のつけ根への流れの傾向は良く合っており、また流速の大きさもほぼ一致している。次に図-7と9の流況比較を行えば、蛇行しながら流れている状況がほぼ再現されていると言えよう。しかしこの場合も潜堤上及び潜堤外にもかなり強い流れが発生しており、この点に関しては実験と計算が相違する。この理由としては図-8の場合と同様な理由が考えられるが、十分に検討することはできなかった。

以上のように、幅の狭い潜堤と突堤を組合せた場合は波向によって一方向の循環流が発生し易く、このため浮遊した底質が流れによって運ばれたとしても、波向によって流向が絶えず逆転するとすれば、底質は堤内で安定化せず、堤外に運ばれ易いと考えられる。

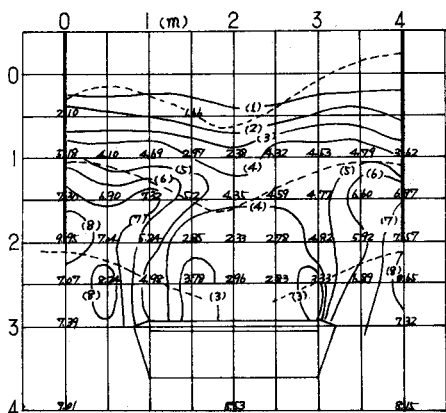


図-14 波高分布 (No. 5, 離岸堤+突堤, 中央配置)

の高い所から低い所へ流れが生じていることが明らかになる。また実験値と計算値は共にバラツキは存在するもののほぼ一致をみている。

5.4 離岸堤と突堤の組合せ (No. 5)

図-14は離岸堤を突堤間の中央に配置した場合の波高分布を示す。また図-15, 16は各々実験及び計算による流況図を示している。図-15によれば、離岸堤背後の遮蔽域の波高は回折波のため開口部の約 $\frac{1}{2}$ になっている。このような波高分布によって背後部には図-15に示すような二つの循環流が発生する。しかしこの循環流は他のケースと比較するとそれほど明瞭ではなく、また波向の変化とともに流速場は変動し安定しない。実験と計算値の比較に関しては、計算では明らかに二つの循環流が存在するが、実験では二つの循環流は存在するもののパターンとしては明白ではない。

流れの特長としては、突堤に沿って波の進行方向に向いた流れの集中があるために、突堤部分の洗掘が助長される可能性がある。

5.5 離岸堤と突堤の組合せ (No. 6)

図-17は突堤を離岸堤に接続するまで伸して配置した場合の波高分布を示したものであり、突堤長を変えた以外はNo. 4のケースとすべて同じ条件である。このため図-10と図-17の波高分布は非常に類似している。この場合も離岸堤の回折波が突堤で反射されるために突堤沿いに波高が大きい部分が存在する。

次に流況を示すのが図-18 (実験) 及び図-19 (計算) である。これらの図によれば、離岸堤と突堤を開口部を持たせて配置したものと基本的には同様なパターン、すなわち、二個の循環流から成るが、この循環

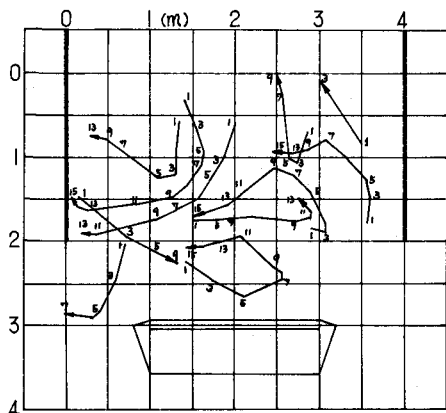


図-15 流況図 (No. 5, 実験)

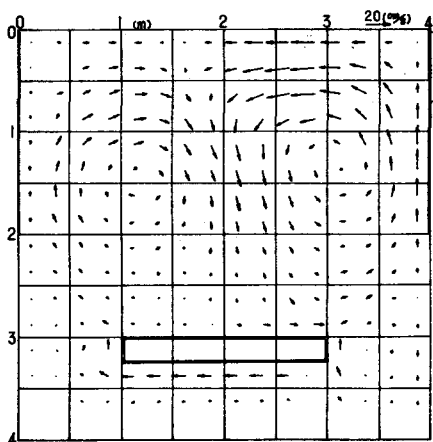


図-16 流況図 (No. 5, 計算)

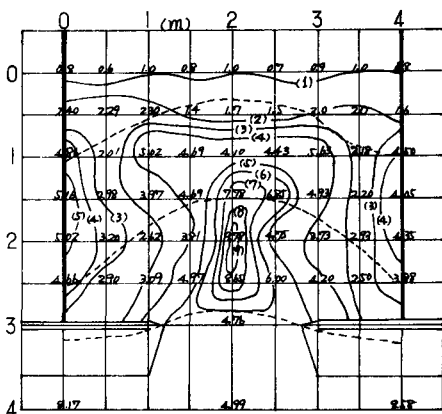


図-17 波高分布 (No. 6, 離岸堤+突堤, T字型配置)

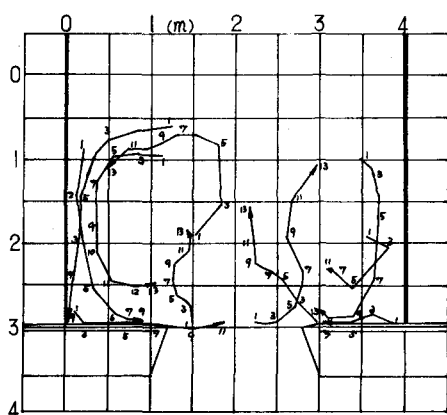


図-18 流況図 (No. 6, 実験)

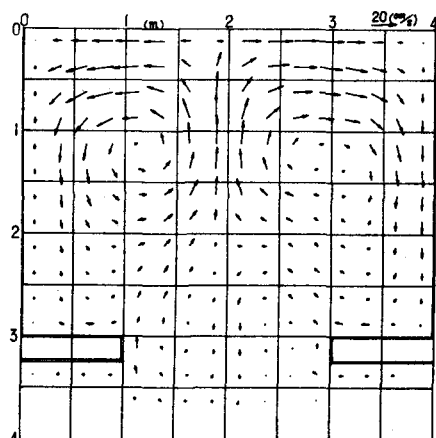


図-19 流況図 (No. 6, 計算)

流は突堤沿いに流れた後、離岸堤近傍で流れはほぼ直角に曲り、その後は突堤沿いにほぼ平行に流れる。このような循環流の形状は先のNo. 4の場合の同心円状の循環流とはかなり相違している。

一方、計算と実験の比較に関しては、図-18においては汀線際のデータが存在せず比較できないが、流速分布のパターンや循環流の中心などは比較的良く対応していると言えよう。

6. 運動方程式各項の空間分布と計算の再現性

前節に述べた計算例によれば、数値計算による海浜流の再現性はかなり良好であることが明らかになったが、この点を更に詳細に調べるために、運動方程式の各項の空間分布を調べた。図-20と21はNo. 4の実験ケースにおいてy方向の運動量式(式(2))の各項の分布を示している。図-20は汀線より1mの距離の断面内の分布、図-21は突堤間の中央における汀線と直角方向の分布を示す。図-20のグラフの定義は図-21と同様であり、また図上に示された項以外はほぼ無視できる。これらの図より、現象は radiation stress と水面勾配項によって支配されており、拡散項、非線型項及び摩擦項は前二者に比較すると相対的に小さくなっている。

数値計算上重要な点は、非線型項のオーダーが相対的に小さいことである。著者ら³⁾は本報と同様な計算法によって定常流と非定常流の数値計算を行い実験値との比較を行ったが、その際、定常流の計算は非線型項が主要な項になるために、著者らが用いた差分形式では再現性は悪く、一方、非定常流の場合は時間変化項と水面勾配項に対して非線型項は相対的に小さくなるために再現性が良好になることを明らかにした。ここで述べた海浜流計算の再現性が比較的良好な原因の一つには、一次の量として radiation stress と水面勾配項が存在し、それらに対しては非線型項が二次の量と見なせることによると考えられる。

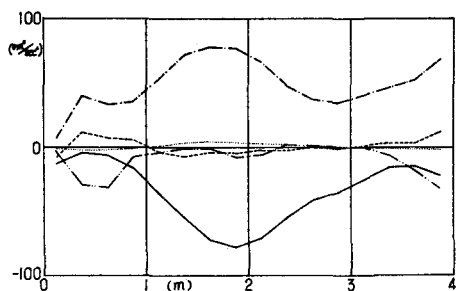


図-20 y方向運動量式の各項の値 (汀線方向)

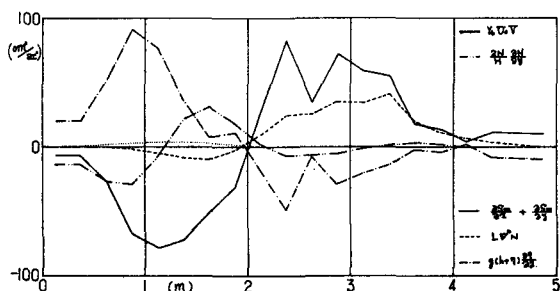


図-21 y方向運動量式の各項の値 (汀線と直角方向)

7. あとがき

海浜流の数値計算モデルの実験的検証を行い、併せて構造物の養浜効果を検討するために、固定床模型実験を行った。実験によって得られたデータを基にして数値計算を行ったところ、流況については詳細な点についてはなお問題が残っているものの、全体的な流況パターンについては相当再現性は良好であり、また水位分布も許容される誤差の範囲内で再現が可能になったことが明らかになった。また養浜効果に関しては、突堤と離岸堤の組合せが堤内にトンボロを最も形成させ易く、堤内の底質が安定化することを明らかにした。

以上のように、計算による流況の再現性が良いことから、このようなモデルを海底地形変化モデルに組込むことや、物質の拡散を検討するための手段として用いることも合理的であろう。しかしながら現在の方法は波高及び波向が与えられることを前提条件としており、一貫した計算法とするには構造物の周囲における波高分布解析法の開発が必要である。

なお、本報では渦動粘性係数や摩擦係数を変えた場合の比較検討は充分に行うことができなかった。この点に関しては更に検討する必要がある。

参 考 文 献

- 1) 橋本宏・宇多高明：海浜流の数値計算法とその応用，第21回海岸工学講演会論文集，P355，1974．
- 2) Longuet-Higgins：Progress in the study of Longshore Currents，pp 203～248，
“Waves on Beaches and Resulting Sediment Transport, edited by R.E. Meyer，
Academic Press，1972．
- 3) 橋本宏・宇多高明：潮流の再現性に関する研究，第24回海岸工学講演会論文集，P 567，1977．