

浅海域における波浪変形計算手法の拡張

New Approach to Computation of Wave Deformation in Shallow Water

鈴木康正*・平石哲也*・望月徳雄**・森川高德***

Yasumasa SUZUKI, Tetsuya HIRAIISHI, Norio MOCHIZUKI and Takanori MORIKAWA

Accurate estimation of wave set-up in wave breaking zone is of great importance to the design of maritime structures in shallow water area. A new computation method applying the energy flux equation is proposed to estimate wave set-up, coastal currents and wave deformation. The estimated wave set-up and heights on an uniform slope agrees to an experimental result at shore boundary. In the comparison of field observation, the estimated error of wave set-up and heights is about 15% and 30% respectively at shore boundary. Therefore, this model can be applied to the estimation of wave deformation in shallow water.

Keywords: Wave breaking, Radiation stress, Wave set-up

1. はじめに

沖からの進行波が砕波点直前に近づくと平均水位は静水面より低下し、砕波帯内では逆に平均水位が上昇する。これらは、「Wave set-down」および「Wave set-up」と呼ばれ、このうち、砕波帯内での「Wave set-up」は、リーフや島などで水深が急変する場所で卓越し、水深を増大させ、砕波波高を高める可能性がある。よって、砕波による波の変形を論じる場合には、砕波による波高減衰と水位上昇による波高増大を同時に関連させて解く必要がある。このようなことから、本研究では、エネルギー平衡方程式を用いた浅海域における波浪変形計算手法を拡張し、平均水位上昇量を考慮できる波浪変形計算手法を提案した。

2. 波高変化に伴う平均水位の変動と流れの発生

砕波帯内外における平均水位の変動は、沿岸流、離岸流などの海浜流と密接な関係にあり、いずれも、Longuet-HigginsおよびStewart(1960)が提案したラディエーション応力を外力として引き起こされることが知られている。

ラディエーション応力とは、波の存在する時の運動量フラックスから静水圧を差し引いたもので、波の存在によって生じる過剰運動量フラックスと定義され、一般に次式で表される。

$$S_{xx} = E \frac{C_g}{C} \cos^2 \theta + \frac{E}{2} \left(2 \frac{C_g}{C} - 1 \right) \quad (1)$$

$$S_{xy} = S_{yx} = E \frac{C_g}{C} \cos \theta \sin \theta \quad (2)$$

$$S_{yy} = E \frac{C_g}{C} \sin^2 \theta + \frac{E}{2} \left(2 \frac{C_g}{C} - 1 \right) \quad (3)$$

ここに、

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (4)$$

であり、 C_g は群速度、 C は波速、 ρ は海水の密度、 g は重力加速度、 θ は波向とx軸のなす角度である。

このことから、砕波帯内外の平均水位変動量を求めるためには、上述のラディエーション応力を外力とした運動方程式(5)、(6)および連続式(7)により、海浜流と同時に解く必要がある。

* 正会員 運輸省港湾技術研究所 (〒239 横須賀市長瀬3-1-1)

** 運輸省港湾技術研究所

*** 玉野総合コンサルタント㈱

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{1}{\rho(h+\bar{\eta})} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yx}}{\partial y} \right) = -g \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} - F_x + M_x \quad (5)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{1}{\rho(h+\bar{\eta})} \left(\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) = -g \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial y} - F_y + M_y \quad (6)$$

$$\frac{\partial \bar{\eta}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}(h+\bar{\eta})}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}(h+\bar{\eta})}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

ここに、 $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ は各々、水深方向に平均化されたx方向およびy方向の平均流速、 $\bar{\eta}$ は平均水位変動量、 t は時間、 S_{xx} 、 S_{yy} 、 S_{xy} 、 S_{yx} は、式(1)～(3)に示したラディエーション応力であり、 F_x 、 F_y は摩擦項、 M_x 、 M_y は水平拡散項である。なお、摩擦項、水平拡散項の詳細はそれぞれ、本間、堀川(1985)および樺木(1986)を参考とした。

3. 数値計算法の概要

水位変動量を考慮した波浪変形計算法は大きく3つの部分に分かれる。

1つめは波の場の計算であり、これには高山ら(1991)が提案した波浪変形計算法を用いた。この手法はエネルギー平衡方程式に砕波によるエネルギー減衰率を取り入れた下記の方程式を解いて、各格子内の方向スペクトルとそれに続く各種代表波高、周期および波向を求めるものである。

$$\frac{\partial}{\partial x} (SC_e \cos \theta) + \frac{\partial}{\partial y} (SC_e \sin \theta) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{SC_e}{C} \left\{ \frac{\partial C}{\partial x} \sin \theta - \frac{\partial C}{\partial y} \cos \theta \right\} \right] = -\epsilon_b' S \quad (8)$$

ここに、 S は方向スペクトル密度、 ϵ_b' は単位時間当たりの砕波によるエネルギー逸散率を示す。

2つめは、求めた波の場より、式(1)～(3)を用いてラディエーション応力を計算し、それを外力として、式(5)～(7)の運動方程式および連続式を同時に解いて、流れの場と平均水位変動量を求める工程である。ここで、運動方程式および連続式の解法には、堀江の報告(1980)に基づき、差分近似解法の1つであるADI法(Alternating Direction Implicit Method)を用いた。

3つめは、求めた平均水位変動量より水深を補正し、再び、波の場、流れの場および水位変動量を計算する部分である。

そして、この繰り返しにより平均水位の変動が収束したときの波高を、平均水位変動量を考慮した波高とした。

なお、海浜流自体も、波の場に影響を与える。さらに、波と流れの作用は海底地形の変化につながり、それは再び波と流れに影響する。しかし、本研究では波と流れの干渉や波による海底地形の変化を考慮した計算は行っていない。図-1は以上までに述べた本計算法の基本的な流れである。

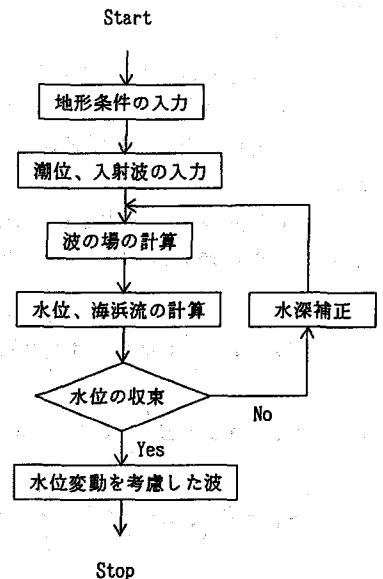


図-1 計算の基本的流れ

4. 本計算法の妥当性の検討

本計算法の妥当性を検討するため、一様勾配を対象とした模型実験値(高山ら, 1987)および現地観測値(高山ら, 1987)との比較を行った。

(1) 模型実験値(高山ら, 1987)との比較

図-2は、実験に用いた水槽、造波装置ならびに斜面模型の平面図である。水槽は長さ36m、幅24mで、水深は1.2mまでとることができる。水槽の南側の壁面に沿ってサーペント型造波装置が設置されている。本造波装置は斜め波、単一方向不規則波、多方向不規則波を造波することができる。水槽の他の3側壁沿いには横スリットを有するプレストレストコンクリート製

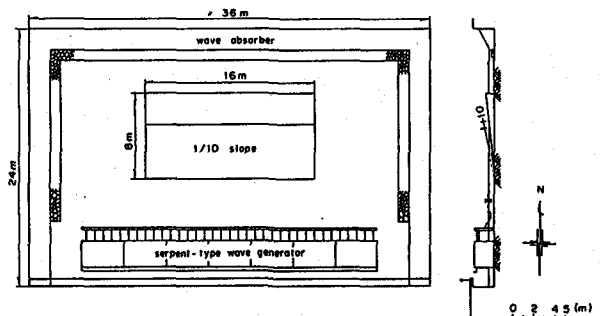


図-2 実験水槽平面図(高山ら, 1987)

の傾斜版を置いた消波工が設置してある。水槽の中央部には、縦8m、横16mで1/10勾配を持つ一様勾配の海底床模型が設置してある。

図-3は斜面上に設置した容量式波高計の設置点を示している。図のように、海底床模型前面の平坦部には、造波板前面より4m離して4本の波高計を組み合わせた波高計アレイを設置して入射波の方向スペクトルを求めている。

また、模型床上では汀線と平行方向に3つ、汀線と直角方向に1つの測線を設け、各測線上No.5からNo.9までの5点で平均水位上昇量を計測した。ただし、一回の計測では1本の測線でしか計測は行わず、同一の波を4回作用させて各測線毎に計測を行った。

実験では、斜面先端の水深を50cmで一定とし、換算沖波波高10cm、周期1.75秒、 $H_o/L_o=0.02$ の波（目標波）を、単一方向不規則波として直角入射させて行った。

図-4(a)~(b)は、実験値と本計算値の比較である。図中の丸印および黒三角印は、各々、本計算値および実験値である。

はじめに、平均水位変動量についてみると、水深波高比 $h/H_o > 1.0$ までは本計算値は実験値に比べて低くなっている。また、 $h/H_o=0.3$ 付近では、本計算値と実験値はほぼ一致している。

有義波高についてみると、いずれの水深においても両者はほぼ10%以内の差でよく一致している。

以上のように、本計算値と実験値の比較では、水位上昇量で一部差異がみられたものの、全体的には10%以内の差ではほぼ一致しており、実用上十分な精度を有していると言える。

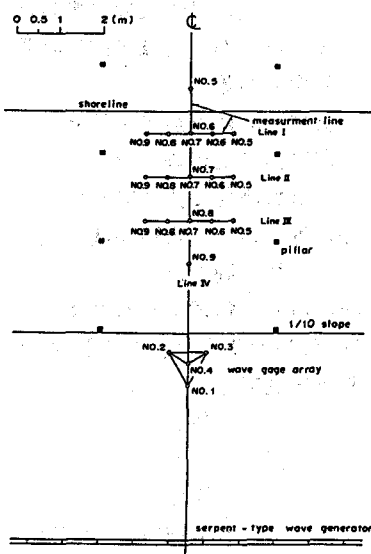


図-3 波高測定点（高山ら,1987）

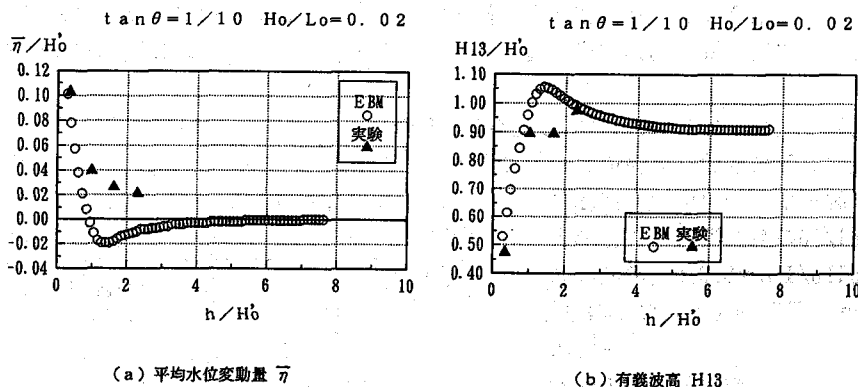


図-4 一様勾配における平面実験値との比較

(2) 現地観測値(高山ら, 1987)との比較

図-5は、現地観測地点の平面地形を示している。図中K点は、茨城県鹿島港の南東約2Km沖合いの水深20m地点で、運輸省第二港湾建設局の超音波式波高計が設置してある。H点は運輸省港湾技術研究所が持つ全長427mの観測栈橋で、碎波帯内の波浪観測が実施されている。

対象とした現地観測は、1987年9月17日16:00のものであり、その観測手法は、K点ではアナログデータレコーダーを用いて波形を長時間記録した。一方、H点の栈橋上では、図-16に示すように、ch. 1~4までの計4台の空中発射型超音波式波高計を、番号の若い順に、汀線から約380m、260m、130m、20mの位置に設置した。設置地点の水深は、工事基準面を基準として、4.8m、4.1m、2.0mおよび0.4mである。ただし、観測期間中、潮位を測定し、解析時には実水深に補正した。観測栈橋で観測した波形記録は観測室のデジタルレコーダーに収録した。観測は毎正時と、毎正時の中間の時刻における前後15分間、計30分間のデータを1ケースとした。すなわち、9:30を代表時間とすれば、9:15から9:45までのデータを用いたことになる。そして、0.5s間隔でサンプリングした3,600個のデジタルデータを用いて、波高、周期、平均水位上昇量および周波数スペクトルを求めた。

観測時における波の諸元は、鹿島港沖で有義波高6.06m、有義波周期11.0sである。

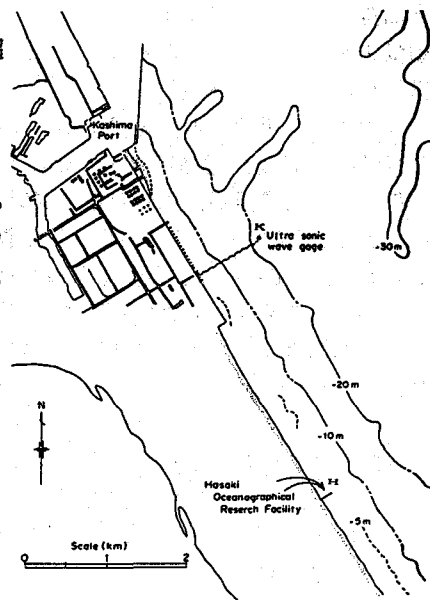


図-5 現地観測地点（高山ら,1987）

図-6(a)~(b)は、平均水位上昇量および有義波高に関する現地観測値と本計算値との比較である。なお、平均水位上昇量の現地観測値は、柳嶋ら(1988)の手法にしたがって気圧低下と吹き寄せによる水位上昇分を除去してある。図中の丸印および黒三角印は、各々、本計算値と現地観測値である。

はじめに、平均水位変動量についてみると、水深波高比 $h/H_o=0.8$ 付近では本計算値は観測値に比べて低くなっているが、水深が浅くなるにつれ両者は一致する傾向にあり、領域の最も岸側 $h/H_o=0.3$ 付近での差は15%程度である。

有義波高についてみると、 $h/H_o=1.0$ 付近では、本計算値は観測値に比べ高くなっているものの、水深が浅くなるにつれ、両者は一致する傾向にあり、領域の最も岸側の $h/H_o=0.3$ 付近での差は30%程度である。

なお、計算値と観測値との間にみられた差異の一要因としては、本計算では全ケースとも、1989年8月時点の海底

地形データを使用したこと、本計算メッシュが50mとやや荒く、バー、トラフなどによる局所的な地形変化を一部カバーしきれなかった可能性があることなどが挙げられよう。

以上のように、本計算値と現地観測値の比較では、領域の最も岸側において、一部を除き、平均水位上昇量で15%、有義波高で30%程度の差であることから、本手法は現地に適用可能であるものと判断する。

5. 本計算法の適用例

(1) 平均水位上昇量の波高への影響

図-7(a)~(b)は、海底勾配1/10の急勾配海岸に波形勾配 $H_o/L_o=0.015$ (沖波波高9m、周期19.6s) のうねり性の波が来襲したときの平均水位変動量の変化と、その変動量を考慮した場合および考慮しなかった場合の有義波高の比較である。図-7(b)の丸印と四角印は各々、平均水位変動量を考慮する前の波高と考慮した後の波高である。

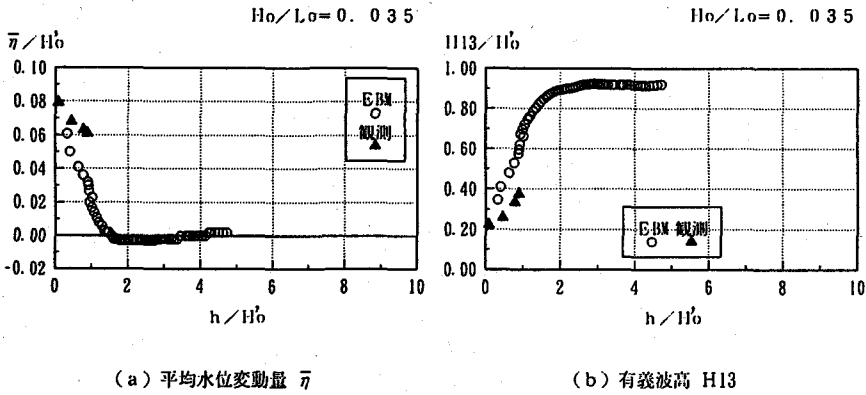


図-6 波崎現地観測値との比較

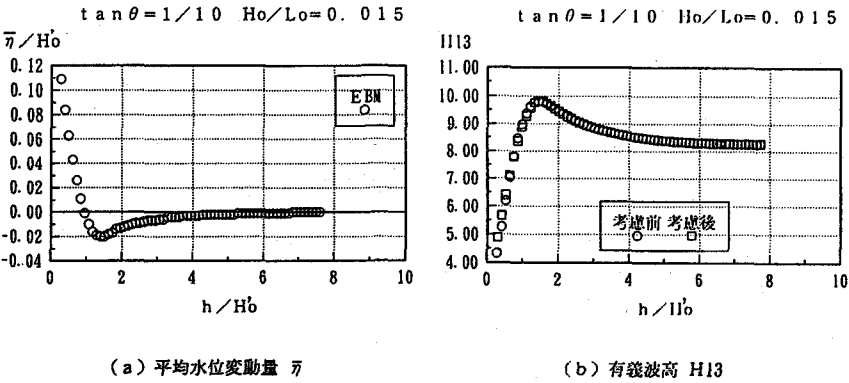


図-7 平均水位上昇量の波高への影響

はじめに、平均水位変動量についてみると、水位は $h/H_o=1.1$ 付近より上昇に転じ、領域の最も岸側に当たる $h/H_o=0.3$ 付近 (水深2.5m) では $\eta/H_o=0.12$ 、次元量にして1.0mに達している。

この水位上昇量が波高に及ぼす影響をみると、 $h/H_o=0.5$ 付近より両波高に差が現れはじめ、領域の最も岸側、水深2.5m付近では、平均水位上昇量を考慮しない場合の波高は4.3mであるのに対し、考慮した場合の波高は4.9mと、60cm以上も高くなっている。水深がさらに浅くなれば、両者の波高差は一層大きくなり、波力や波エネルギーの算定に大きな影響を及ぼしてくる。

このようなことから、碎波帯内における設計波高の推算に際し、平均水位上昇量の考慮が重要であることが明らかとなった。

(2) 突堤が存在するモデル海岸での計算例

図-8(a)~(c)は突堤が存在する直線等深線海岸に入射角20度で波が進入したときの平均水位変動量、有義波高および流れを示したものである。計算に際しては、沖波波高9m、周期12.0秒、波形勾配0.04、海底勾配1/30、計算格子間隔30mとし、突堤は汀線に直角に660m程度沖へ伸ばす形とした。

はじめに、平均水位変動量についてみると、Set-downは突堤を挟んで上手側の方が全体に少なく、突堤先端付近において下手側で-0.1m程度低下しているのに対し、上手側はほとんど下がっていない。さらに岸へ向かうと、上手側の方でSet-upが大きくなり、突堤付近の最も岸側では下手側で0.5m程度の上昇であるのに対し、上手側では0.8m前後となっている。

上手側でSet-upが卓越するのは、突堤によって流れがせき上げられたためと推察される。

有義波高についても、突堤付近において、上手側が下手側より10~40%程度高くなっている。これは、上手側では突堤によって、波エネルギーの沿岸方向成分の流出が抑制され、逆に下手側では当該エネルギーの流入が抑制されるからである。

流れの傾向についてみると、上手側は突堤によって流路が阻まれ、突堤に沿って沖へ向かい、先端を迂回するような流れが生じている。突堤沿いでの沖向き流れは最大 0.5 m/s 弱である。一方、下手側では流れが徐々に元の状態に戻ろうとしており、かつ、突堤中間部に小さな渦も生じている。また、沿岸流は上手側の突堤から最も離れた部分で最大となり、 0.7 m/s 強となっている。

(3) 中城湾における計算例

図-9 (a)~(d)は沖縄県中城湾における潮位補正後の水深、平均水位変動量、有義波高および流れを示したものである。計算は、沖波波高 7.3 m 、周期 10.0 s 、波形勾配 0.047 、 $S_{\max}=25$ 、直角入射、計算格子間隔 200 m で行った。なお、流れについては、場所による差が大きい($0\sim 1.0\text{ m/s}$)ことから、ベクトル表示範囲は $0\sim 0.3\text{ m/s}$ 以上とし傾向をみることにした。

はじめに、海底地形についてみると、沿岸距離 1.0 km 、離岸距離 10.0 km 付近の沖合いに津堅島が、また同じ沖合いの沿岸距離 7.0 km 付近にはチクニガと呼ばれる浅瀬がある。さらに計算領域の中央部に当たる沿岸距離 4.0 km 、離岸距離 7.0 km 付近を頭にリーフ地形が形成され、緩やかな起伏を有しながら、岸に向かって扇状に広がっている。計算領域の最も沖側は水深 50 m 前後、リーフ地形では概ね 15 m 以浅となっている。

平均水位変動量についてみると、沖合いでは、津堅島前面で水深が一気に浅くなるため、最大 0.7 m 程度のSet-upがみられが、そのほかはほとんど変化していない。中央部から岸に向かうと、リーフ地形上では水深に凹凸があるため、Set-up、Set-downを繰り返し、やがて徐々に水位は上昇するものの、海底勾配自体が非常に緩く波高変化が小さいことから、最も岸側においても平均水位上昇量は $0.20\sim 0.24\text{ m}$ 程度である。リーフ地形以外の場所でも全体に緩勾配となっているため、最岸部で概ね 0.2 m 前後の水位上昇量にとどまっている。

有義波高についてみると、領域入射時に 7.0 m 程度あった波高が、津堅島前面では碎波により、一気に 2.0 m 前後まで低下している。津堅島の上部にあたる沿岸距離 $3.0\sim 6.0\text{ km}$ の範囲では、沖から湾中央部まできわめて緩やかに波高が減少してゆくが、リーフ地形に入ると、碎波により 5.0 m 前後に低下し、その後は、岸に向かって緩やかに低下し続け、最岸

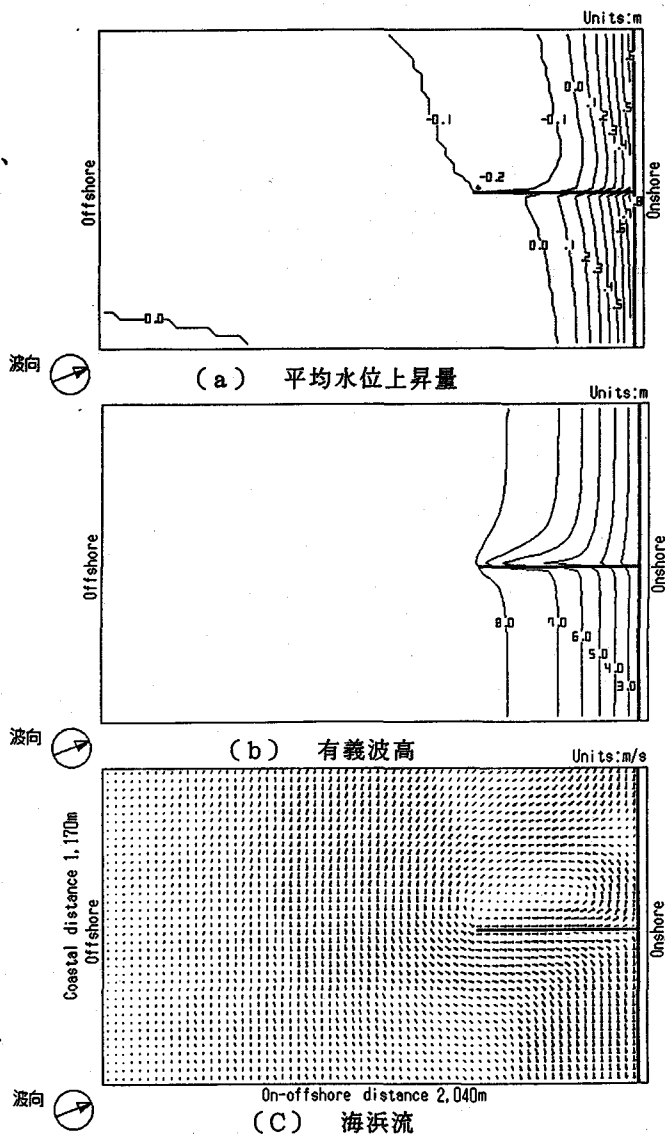


図-8 突堤が存在する海岸における計算例

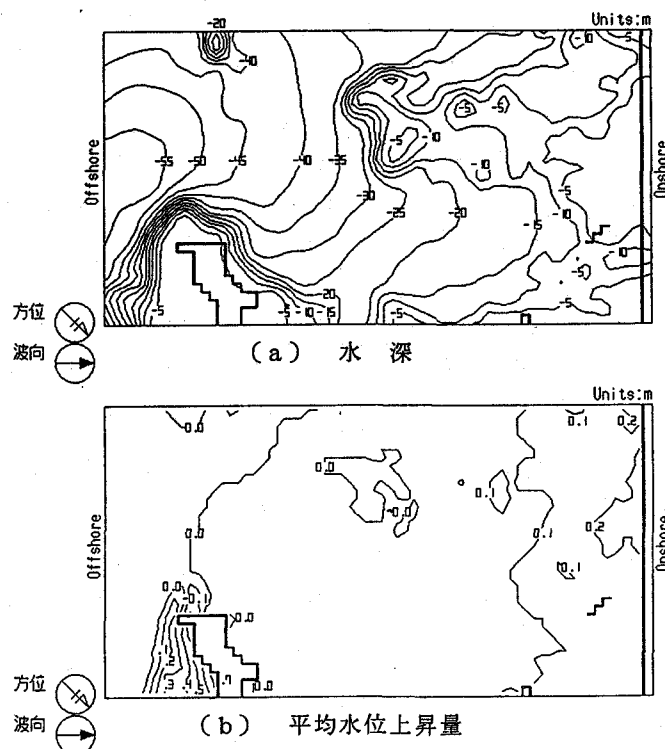


図-9 中城湾における計算例(1)

部で2.0～3.0m程度となっている。領域上部、沿岸距離6.0km以降の範囲では、リーフ地形が存在しないことから、波高の変化はさらに少なく、離岸距離3.0km弱まで波高6.0m前後を保ち、その後は徐々に低下して最岸部では2.5～3.5m程度となっている。

流れの傾向についてみると、津堅島前面付近では、碎波の影響により、島に沿って沿岸方向の流れがみられ、直前面では渦も形成している（渦内での流れは最高0.8m/s程度）。沿岸方向の流れは島を回るようにして岸沖方向に向きを変え、その後、一旦弱くなるものの、湾中央部、リーフ地形の立ち上がり付近より、再び屈折や碎波の影響等により0.3m/s前後の岸向き流れとなる。この流れは離岸距離2.5km付近より、時計回りに方向を変えて最大1.0m/s程度の沿岸方向の流れとなり、さらに沖向き流れとなる。その一部は沖へ戻るが、多くは再び岸へ転換して渦を形成する。そのほか、離岸距離2.5km付近、沿岸距離6.0km以降の範囲においても、複数の渦がみられるほか、湾中央部にも、弱い渦が形成されている。

あ と が き

碎波帯内外での波高変化にともなう平均水位の変動を、海浜流と同時に解き、その水位変動を考慮した波浪変形計算を試みた。その結果、一様勾配を対象とした平面水槽における実験値との比較では、平均水位上昇量は領域の最も岸側で一致し、有義波高も10%以内の差ではほぼ一致した。さらに、波崎現地観測値との比較では、領域の最も岸側において、平均水位上昇量で15%、有義波高で30%以内の差であることから、本手法は現地に適用可能であるものと判断する。

（参考文献）

榎木 亨 (1986)：漂砂と海岸侵食，森北出版。

高山知司・平石哲也・高山優 (1987)：多方向不規則波の斜面上における碎波特性，第38回海岸工学講演会論文集，pp.182～186。

高山知司・池田直太・平石哲也 (1991)：碎波および反射を考慮した波浪変形計算，港湾技術研究所報告，第30巻，第1号，pp.21～67。

堀江 毅 (1980)：沿岸海域の水の流れと物質の拡散に関する水理学的研究，港湾技術研究所資料，No.360，220p。

本間仁・堀川清司 (1985)：海岸環境工学，東京大学出版会。

柳嶋慎一，加藤一正他2名 (1988)：波による汀線付近の水位上昇量に関する現地調査，第35回海岸工学講演会論文集

Longuet-Higgins, M. S. and R. W. Stewart (1960)：Radiation stresses in water waves, a physical discussion, with application, Deep sea Research, Vol.11, pp.529～562。

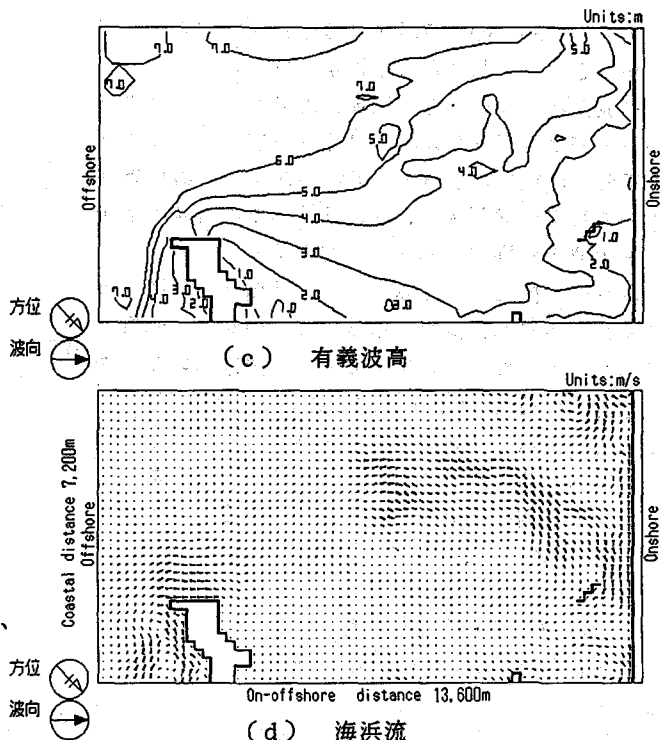


図-9 中城湾における計算例(2)