

波のエネルギーとの干渉を考慮した長周期波数値シミュレーション

中 村 聡 志*

1. はじめに

海岸域における海浜流の変動や Surf beat などの長周期動揺現象は、予想を越える前浜の急激な侵食や沿岸砂州の移動に影響していることが報告されている (Katoh・Yanagishima, 1990)。この長周期 (1分から数分) 波の発生原因には、その周期との関連から、個々の波の波群に拘束されたセットダウン波 (Longuet-Higgins・Stewart, 1962)、砕波・波の屈折・回折による拘束波の開放、砕波による Radiation Stress の時空間変動 (Symonds ら, 1982)、遡上時の波の長周期化等の機構が考えられている。これらの発生機構にもとづくと、潜堤等の消波構造物は、個々の波のエネルギーを減殺する効果とともに、長周期波の発生源となる。また、その岸沖設置距離と入射波群の周期によっては、汀線と潜堤の間で長周期波の多重の反射を引き起こし、潜堤岸側の地形変化や予想以上の遡上を起こす可能性がある。汀線と沿岸砂州との間での長周期波の反射・定在波を説明する理論モデル (Symonds・Bowen, 1984)、リーフ上または一様斜面上での長周期波の発生・伝播を計算する数値モデル (たとえば Nakaza ら, 1991; Zou・Dodd, 1994) も提案されているが、Radiation stress (線形進行波では周期の短い波のエネルギーに比例する) を波の場から計算された長周期波をひき起こす外力として取り扱っているため、ごく浅海 (汀線および潜堤上) で顕著になると考えられる長周期波と個々波との干渉は考慮されていない。また、数値計算上汀線は移動しないまたは特殊な移動境界を用いて計算せざるをえない。

本報告では、個々波のエネルギーと長周期波との干渉を考慮した長周期波の発生・伝播・遡上モデルを提案し、平均水位変化による汀線移動の取り扱いを容易にする数値解法を用いて、断面 1 次元における計算を行った。また、Stive・Wind (1982) の規則波による一様勾配での wave set-up, set-down による平均水位変化の実験結果、Mase (1995) の二成分合成波による一様斜面上での波の遡上実験および第四港湾建設局下関調査設計事務所で行われた三成分合成波による一様勾配斜面と斜面上に潜堤を

設置した実験結果を用いて数値計算結果の検証を行った。

2. 基礎方程式

数値モデルに用いた断面 1 次元の長周期波の基礎方程式は、オイラーの式を個々波の周期スケールで時間平均と水深方向に積分して求めた非線形長波の連続式および運動量方程式 (Mei, 1990)。

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial DU}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial DU}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(DU^2 + \frac{1}{2} g D^2 \right) = g D \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{S_{xx}}{\rho} \right) - \tau_b \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで $D = h + \bar{\eta}$ は平均水深、 U は水深方向に一樣な流速、 τ_b は $\tau_b = \rho(f_w/2)(U|U|/D)$ で表される底面摩擦項である。

連続式・運動量方程式と同様に時間平均と水深方向に積分したエネルギー・バランズ方程式、

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(C_g + U)E] + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{US_{xx}}{\rho} \right) = -(\text{Dissipation}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

を用いた。エネルギー方程式中には、個々波のエネルギーと長周期波の流速との干渉を表す項 $\partial UE/\partial x$ および $\partial US_{xx}/\partial x$ を残した。また、エネルギー・逸散項は、砕波波高水深比による確率砕波の式 (Roelvink, 1993)

$$(\text{Dissipation}) = \left[1 - \exp \left\{ - \left(\frac{H}{\gamma D} \right)^n \right\} \right] 2 \alpha f_o E \quad \dots\dots (4)$$

ここで f_o は入射波のピーク周波数、 γ は砕波波高水深比、 α, n は係数、を用いた。

波のエネルギーおよび Radiation stress は、砕波帯内の波の挙動が明確でないこと、潜堤・汀線等での周期の短い波の任意反射率および位相の反射波および多成分波の干渉を考慮することは困難であるため、周期の短い入射波は斜面での砕波によって十分にエネルギーを失い反射しないと仮定して、線形進行波のエネルギーと波高の関係式 $E = (\rho g/8) H^2$ および Radiation stress の評価式 $S_{xx} = E(2(C_g/C) - (1/2))$ を準用して計算を行なった。この仮定は潜堤を設置した実験との比較において、潜堤前面

での反射波領域での長周期波の波形に差異を生じさせる。

3. 数値計算方法

基礎式の解法には、汀線での境界条件の取り扱いを容易にするため、upwind finite volume methodを用いた。この解法は、要素分割した各境界での水深および流速の不連続をボア等の伝播 (Raimann-Gondunov 問題) として取り扱い、無次元化した基礎式を $\sqrt{D}$ で重み付き平均した Local Jacobian $\bar{A}$ を用いて以下のように表す。

$$W_t + \bar{A} W_x = S \quad \cdots \cdots \cdots (5)$$

$$W = \begin{pmatrix} D \\ DU \\ E \end{pmatrix}, \quad \bar{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \bar{D} - \bar{U}^2 & 2\bar{U} & 0 \\ 0 & 0 & C_g \end{pmatrix},$$

$$S = \begin{pmatrix} 0 \\ Dh_x - (S_{xx})_x - \tau_b \\ -(\text{Dissipation}) - (UE)_x - (US_{xx})_x \end{pmatrix}$$

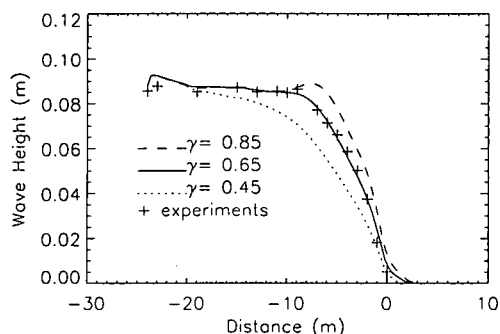
$\bar{A}$ の固有値から得られる特性曲線および特性量を用いて要素分割した境界でのフラックスを計算し近似的に解を求めるものである (Roe, 1986)。このため、波によって移動する汀線においても特殊な境界条件設定をすることなく数値解が求まる。ただし、数値計算上水深が 0 に近づくと流速が無限大になるため、斜面勾配によって決まる微小水深 ϵ を定義し、この水深以下では流速を 0 とした。また、この水深以下となる位置を計算上の汀線位置とした。計算は実験波形の包絡線を求め、その振幅の 2 倍が波高であるとして波のエネルギーの時間変動を沖側の境界から与えて行った。計算方法の詳細については、Nakamura・Dodd (1997) を参照されたい。

4. モデルの検証

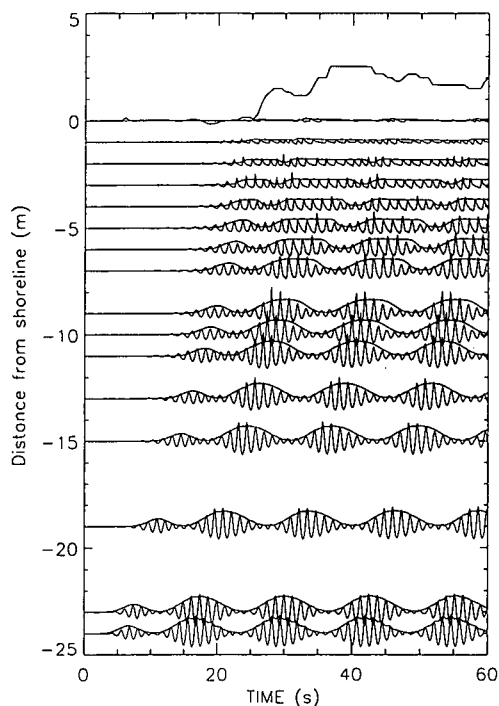
今回のモデルには、汀線位置を決める微小水深パラメータ ϵ 、底面摩擦のパラメータ f_w 、エネルギー逸算式中のパラメータ α, n, γ の合計 5 つのパラメータがある。これらの内 f_w は計算上支障がない限り 0.01 とした。他のパラメータについては実験値との比較によって決める必要がある。

Roelvink (1993) によると今回用いたエネルギー逸散式は簡単な確率砕波の式であるが、砕波の状況に強く影響され、砕波形式によって式中の係数特に砕波波高水深比 γ の値を変える必要がある。そこで、第四港湾建設局下関調査設計事務所実験センター (下関調設) で行われた 1/30 勾配一様斜面上での三成分波 (入射波の波の周期 1.26 s、波高 10 cm の波に波群の周期 12.6 s の波高変調をかけたもの) による実験結果を用いて逸散項の検証を行った。

図一1 は砕波波高水深比の値を 0.45~0.85 とした場



図一1 砕波波高水深比による平均波高分布の変化



図二 実験値の短周期波形と計算値の波の振幅との比較

合の波のエネルギーから計算した平均波高分布と実験で得られた平均波高とを比較したものである (横軸は静止汀線からの距離)。逸散式中の他の係数については $\alpha = 1.0$, $n = 10$ とした。砕波波高水深比が 0.65 の時、波高が最大となる位置および最大値は実験値とよく一致する。

図二は砕波波高水深比が 0.65 の時の実験値の短周期 (6.3 s 以下) 成分波形記録と計算値のエネルギーから換算した波形の振幅の時間変化を造波開始から比較したものである (最上段は汀線位置を示す; 最下段の振幅変化は実験波形の包絡線で数値計算の入力値; 波形記録は -25 m 位置の最大振幅で基準化している)。砕波前の実験値の波群の伝播および砕波による逸散を計算値はよく表している。また、砕波後についても、実験値のわずかに

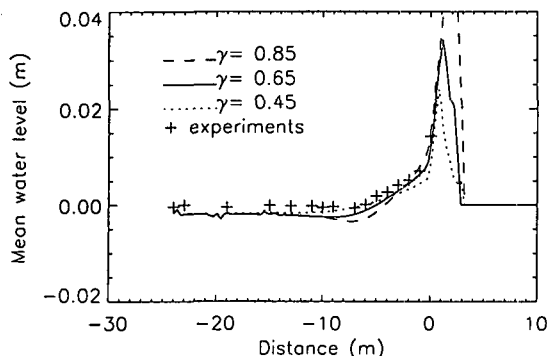


図-3 砕波波高水深比による平均水位分布の変化

残った波群の伝播と計算値のそれはほぼ一致している。

エネルギー逸散項の中の砕波波高水深比によって決まる波高の最大位置は平均水位低下 (wave set-down) の最大位置に影響する。図-3は砕波波高水深比の違いによる平均水位分布の変化を示したものである。平均水位分布の岸沖形状は砕波波高水深比が0.65の場合よく一致する。計算値の水位低下量は実験値と比較してわずかに大きめの値となっている。

図-4は実験値の長周期成分 (6.3 s 以上) 波形記録と計算値の水位変動を比較したものである。砕波位置近傍の波計記録 (-9, -10, -11 m) では、長周期波の谷の位置に相違がある。これは図-2における波群の峰の位置

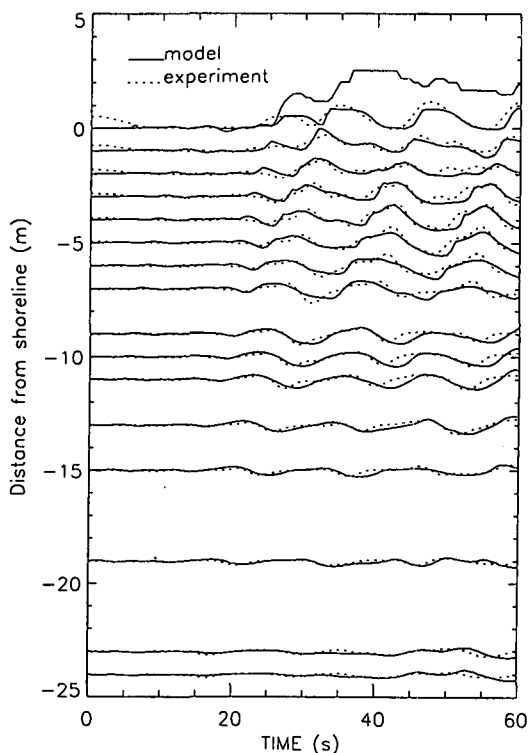


図-4 実験値と計算値の長周期波形の比較

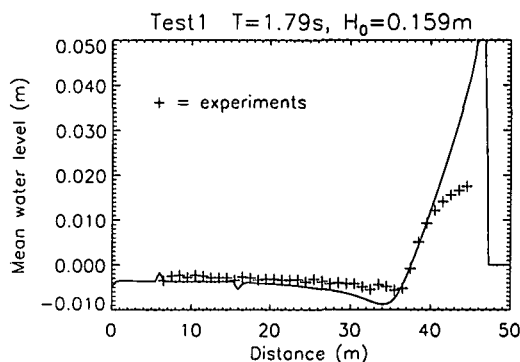


図-5 波形勾配が大きいときの水位低下分布の比較

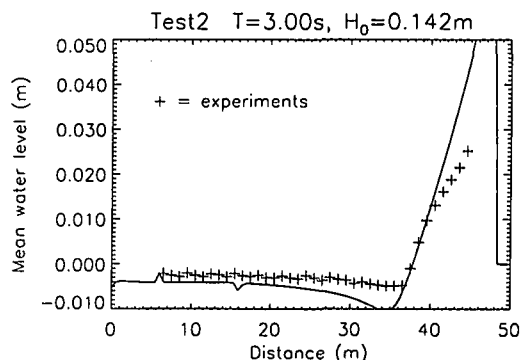


図-6 波形勾配が小さいときの水位低下分布の比較

の相違に対応する。砕波帯内 (-7 m 以浅) および砕波位置沖側 (-13 m 以深) においては、実験値と計算値はよく一致する。汀線位置については実験での目視による平均汀線位置と計算値の平均値はほぼ一致する。

次に、砕波形式の違いによる本モデルの適用性を調べるために、規則波を用いた実験ではあるが、1/40 勾配一様斜面において波形勾配の異なる規則波を用い平均水位の岸沖変化を調べた Stive・Wind (1983) の実験結果と本モデルの計算値との比較を行った。図-5, 6は Stive・Windの実験結果と水位低下の最大位置が最も一致する砕波波高水深比が1.00を用いた場合の計算値と実験値の平均水深の岸沖変化を示したものである。波形勾配の大きい時 (図-5: 彼らの分類では巻波砕波) は水位低下量, 上昇量ともに計算値が大きめの値となっている。波形勾配の小さい時 (図-6: 崩れ波) については波形勾配が大きいときよりもさらに大きめの結果である。いずれの計算結果においても水位低下量の最大値を実験値と一致させるには、砕波波高水深比を1.00とし、さらにエネルギー逸散項中の他の係数についても変化させる必要があるが今回は行わない。

汀線位置の移動については Mase (1995) によって行われた二成分波を用いた 1/20 勾配一様斜面上での波の遡上実験結果と計算値の汀線位置とを比較した (図-7)。

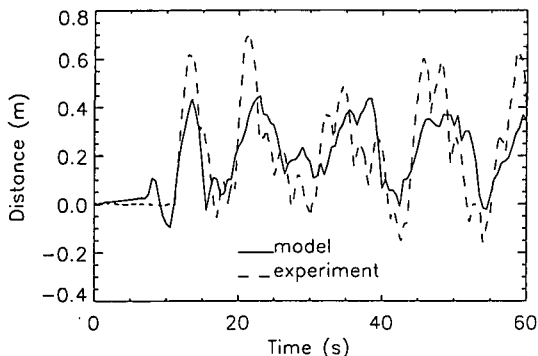


図-7 実験値と計算値の汀線位置変化の比較

図中実験値は Mase による遡上高さの実験結果 (wp1, 4 Hz) を水平距離に変換したものであり, 計算値は汀線を定義する微小水深を約 2 mm, 碎波波高水深比を 0.65 として計算を行った。実験値の個々波の遡上の重なり合いによって変化する汀線位置の変化と本計算による汀線位置の移動との比較はほぼ満足できる。

5. 潜堤実験との比較

天端水深浅い幅広潜堤上での長周期波の発生伝播問題への適用のために下関調設の潜堤実験 (1/30 勾配一様斜面上に天端水深 2.5 cm, 幅 1.5 m の直立不透過潜堤を設置, 入射波の波の周期 1.26 s, 波群の周期 12.6 s, 最大波高 10 cm のケース) と計算値を比較した。以下の図中 8 m 位置を中心に潜堤が設置してある。また, 実験では直立の潜堤を用いられているが, 計算では解が発散しない程度の法勾配を持った潜堤とした。

図-8 は平均波高分布の比較である。実験値では潜堤沖側に潜堤での反射波と入射波による重複波があり, 平均波高分布にばらつきがある。しかし, 進行波のエネルギー式を用いた計算値には分布のばらつきはなく大きく相違している。潜堤内の波高については計算値が若干大きめの値となっているが, 潜堤で碎波後の波が汀線近くで再び碎波している実験状況を計算値は再現している。

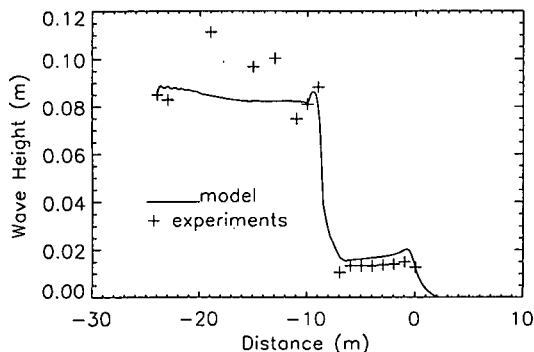


図-8 潜堤実験と計算値との平均波高分布の比較

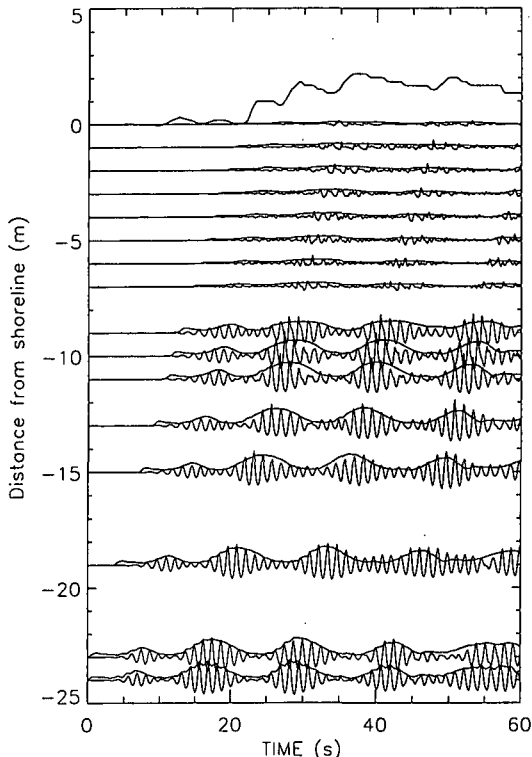


図-9 潜堤実験での短周期波形と計算値の波の振幅との比較

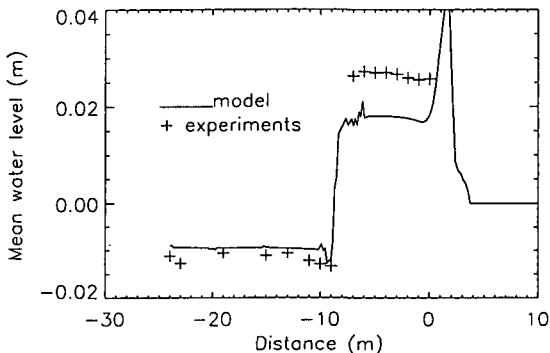


図-10 潜堤実験と計算値との平均水位分布の比較

図-9 は潜堤を設置した実験の短周期成分波形記録と計算値のエネルギーから換算した波形の振幅の時間変化を比較したものである (碎波波高水深比は潜堤なしの場合と同様 0.65)。潜堤での波の反射を考慮していない計算値は実験値に比べて沖側の波の最大振幅に違いがある。潜堤内については透過波のわずかな波群の伝播をよく表している。

図-10 は潜堤を設置した場合の平均水位分布を比較したものである。計算値は沖側岸側両方の潜堤法面および勾配の急変点で平均水位の値に数値計算上の乱れが生じている。潜堤沖側で平均波高の違い (図-8 参照) があ

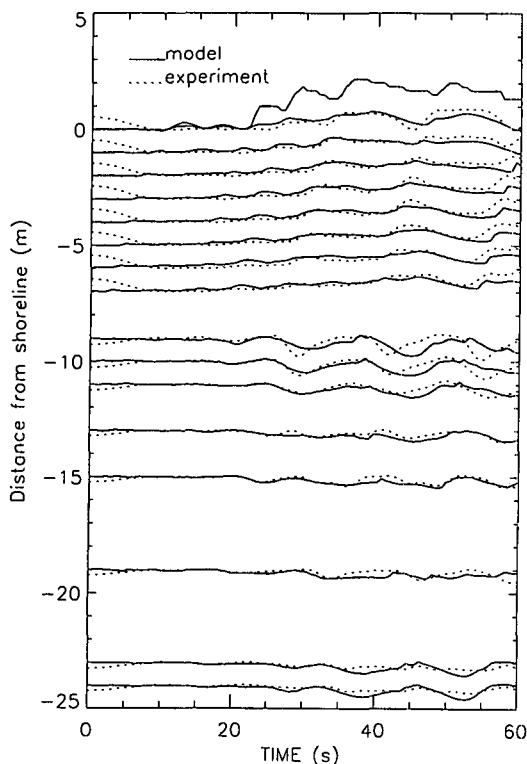


図-11 潜堤実験値と計算値の長周期波形の比較

るにも関わらず、平均水位低下におよぼす影響は小さい。沖側での平均水位低下量は実験値と比較して少なく、それに対応して潜堤内の水位上昇量が少なくなっている。

図-11は実験値の長周期成分波形記録と計算値の水位変動を比較したものである。潜堤前面(-9 m, -10 m位置)での波群中の大きな波高となっている時間(図-9参照)に対応した長周期波の谷の位相のずれが実験値と計算値の間にみられる。

6. おわりに

結論は以下の通りである。

1) 波群に拘束された長周期波、砕波位置の変動による長周期波の発生と伝播、汀線での個々波の遡上(モデルでは波のエネルギーの遡上)による長周期波の発生、ごく浅海での顕著になる個々波のエネルギーおよびRadiation stressと長周期の流速との干渉を考慮した長周期波の数値モデルを提案した。

2) 砕波条件の検証を行った一様勾配斜面での実験の場合、モデル与えられる波の種類によってエネルギー逸散項の波高水深比のパラメータ γ を規則波の場合 $\gamma=1$ 、二成分波および三成分波の場合 $\gamma=0.65$ 、を用いなければならないが、平均水位低下の最大位置と計算結果の最大位置および平均水位の岸沖変化の実験結果と計算値はほ

ぼ一致する。規則波による定常状態の平均水位低下量をさらに一致させるためにはエネルギー逸散項中の他の係数を変化させる必要があるが、波群による平均水位の変動を計算するためには $\alpha=1.0$ 、 $n=10$ とすればよい。

3) 平均汀線位置の移動については、波の遡上実験値の個々波の遡上の重なり合いによって変化する汀線位置の変動と本計算の微小水深で定義される汀線位置の変動とをほぼ一致させることができる。

4) 潜堤を設置した実験との比較では、平均波高変化は、沖側でばらつきがあるが、潜堤内ではよく一致する。潜堤沖側の平均水位低下量の計算値は実験値と比較してわずかに小さい。潜堤内の平均水位上昇量の計算値は潜堤沖側の水位低下量に対応して小さくなっている。これらの相違は、波のエネルギーおよびRadiation stressに進行波の式を用いたため、波の反射による潜堤前面の波高増大と透過波の波高減少および波高変化にともなう水位変化を考慮していないことによる。

5) 現地への適用には、砕波、反射波領域におけるRadiation stressの評価式の改良も含めて、平面2次元への拡張とエネルギー方程式の改良の必要がある。

謝辞：潜堤実験データの使用にあたって運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所ならびに実験センターのご協力を頂いた。ここに記し謝意を表します。

参考文献

- Katoh, K. and S. Yanagishima (1990): Berm erosion due to long period wave, Proc. 22nd ICCE, pp. 2073-2086.
- Longuet-Higgins, M. S. and R. W. Stewart (1962): Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to 'surf beats', J. Fluid Mech., Vol. 13, pp. 481-504.
- Mase, H. (1995): Frequency down-shift of swash oscillations compared to incident waves, J. Hydraulic Res., Vol. 33, pp. 397-411.
- Mei, C. C. (1990): The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves, World Scientific, 764 p.
- Nakamura, S. and N. Dodd (1997): A numerical model of low frequency wave motion on a beach and over reef, Proc. 3rd Ocean Wave Measurement and Analysis Symposium (accepted)
- Nakaza, E., S. Tsukayama and M. Hino (1991): Bore-like surf beat on reef coasts, Proc. 22nd ICCE, pp. 743-756.
- Roe, P. (1986): Characteristic-based schemes for the Euler equations, Ann. Rev. Fluid Mech., Vol. 18, pp. 337-365.
- Roelvink, J. A. (1993): Surf beat and its effect on cross-shore profiles, PhD thesis, Delft Univ. of Tech., 150 p.
- Stive, M. J. F. and H. G. Wind (1982): A study of radiation stress and set-up in the nearshore region, Coastal Eng., Vol. 6, pp. 1-25.
- Symonds, G. S., D. A. Huntley and A. J. Bowen (1982): Two-dimensional surf beat: longwave generation by a time varying break point, J. Geophys. Res., Vol. 87, pp. 492-498.
- Symonds, G. S. and A. J. Bowen (1984): Interaction of near-shore bars with incoming wave groups, J. Geophys. Res., pp. 1953-1958.
- Zou, Z. and N. Dodd (1994): A nonlinear surf beat model, Proc. 24th ICCE, pp. 1961-1974.