

# 汀線変化を考慮した3次元海浜変形長期予測モデル

清水琢三\*・熊谷隆宏\*\*・三村信男\*\*\*・渡辺 晃\*\*\*\*

## 1. まえがき

海岸・港湾構造物周辺の長期的な地形変化に対しては、高波浪時に顕著に発達する海浜流による砂移動が支配的となる場合が多い。海浜流による漂砂のみを考慮した3次元海浜変形モデルは、沿岸流による砂移動を砕波点における波高と波向でマクロ的に取り扱った汀線変化モデルと原理的には同じであるが、沿岸流による漂砂のみならず、海浜循環流による岸沖方向の砂移動も考慮できるなど精度の向上が期待できる。3次元海浜変形モデルは、比較的短期間の平面的な地形変化予測手法として位置づけられてきたが、このように海浜流による漂砂のみを考慮した3次元海浜変形モデルは、これまで長期予測モデルとして実用的に用いられてきた汀線変化モデルでは予測できなかった水深の深い地点の地形変化が適切に計算できるため、汀線変化モデルを平面的に拡張した長期海浜変形予測モデルとして位置づけることができる。モデルの現地適用性についても、数年程度の長期的な地形変化に対して定量的に確認されつつある(例えば、清水ら, 1993)。しかしながら、これまでのモデルでは汀線を固定境界として扱っているため、汀線の前進は計算できても、後退を評価することが困難であった。

そこで本研究では、従来の汀線変化モデルと整合がとれた形で汀線変化を取り扱えるようにモデルの改良を行い、移動床水理実験結果に基づきモデルの検証を行うとともに、現地海岸への適用性についても検討した。

## 2. モデルの概要

### 2.1 モデルの構成

新しい3次元海浜変形モデルの計算フローを図-1に示す。従来のモデルと同様、①波浪場の計算、②海浜流場の計算、③地形変化の計算の3つの計算モデルに大別されるが、汀線変化を精度よく推定するためにはswash zoneの漂砂を考慮する必要があるため、遡上域の波浪場の計算が新たに追加され、海浜流場も遡上域を含めて計

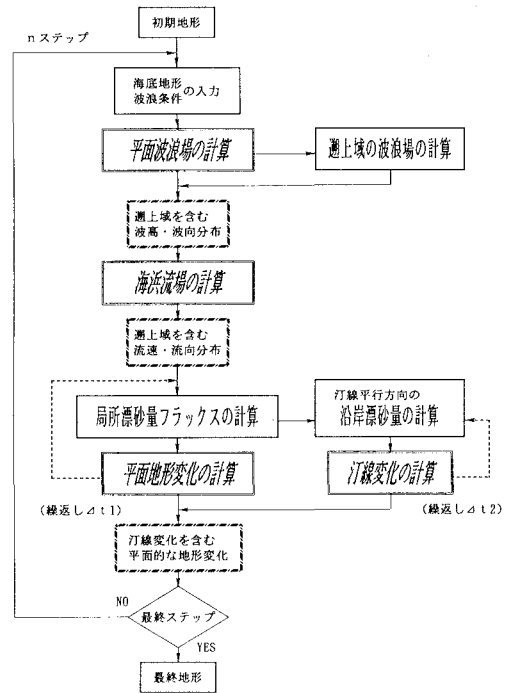


図-1 モデルの計算フロー

算する。さらに、局所漂砂量フラックスから平面地形変化を計算するだけでなく、局所漂砂量フラックスから全沿岸漂砂量を評価し、従来の汀線変化モデルと同様に汀線変化を計算する。長期的な海浜変形を定量的に予測する際には、地形変化が顕著になると波浪・海浜流場が変化するため、地形変化の履歴を考慮して、波浪、海浜流、地形変化の計算を繰り返し計算する。

### 2.2 平面波浪場の計算モデル

平面波浪場計算法としては、多方向不規則波浪場の屈折と回折が同時に取り扱える磯部(1986)の波向線座標を用いた放物型波動方程式による方法を基本とする。ただし、現地海浜への適用に際して計算領域が広範囲になる場合や回折があまり重要とならない場合には磯部(1986)のモデルにより砕波減衰項を考慮したエネルギー平衡方程式による方法を用いる場合がある。放物型波動

\* 正会員 工修 五洋建設(株) 土木設計部  
 \*\* 正会員 工修 五洋建設(株) 土木設計部  
 \*\*\* 正会員 工博 茨城大学助教授 工学部都市システム工学科  
 \*\*\*\* 正会員 工博 東京大学教授 工学部土科

方程式による計算では、通常、磯部(1986)のモデルによる碎波減衰項を考慮した計算法を用いるが、離岸堤や人工島のような島堤の場合には、両端から回折が生じるため、碎波減衰を考慮せずに両側からそれぞれの回折波に対して波向線座標を用いた計算を行い、両者をエネルギー合成して換算沖波波高を求め、合田(1975)の碎波モデルにより碎波波高を評価する方法を用いた(池野ら, 1994)。

### 2.3 遡上域の波浪場の計算モデル

汀線付近の地形変化を精度良く計算するためには、遡上域の波浪場を評価する必要がある。厳密には、波浪・海浜流場の計算を繰り返して平均水位上昇を評価しなければならないが、計算時間短縮のため以下に述べる便宜的方法を用いた。①碎波帯外および碎波帯内の平均水位の変化は、一様勾配斜面上で理論的に求まる近似式(Longuet-Higgins・Stewart, 1962)を用いて評価する。その際、波高水深比 $\gamma$ は平面波浪場の計算結果を用いる。②平面波浪場の計算結果を基に、碎波点における換算沖波波高を求める。この換算沖波波高を用いて Hunt の式により遡上高を評価し、汀線の wave set-up 高と遡上高を直線的に結んで遡上域における仮想水深を設定する。なお、遡上域の前浜勾配は Sunamura (1984) の経験式を用いて外力により変化させた。③碎波帯内の波高は静水深に対して合田(1975)の碎波変形モデルの簡略式を用いて評価し、遡上域の波高は汀線における波高から遡上点まで直線的に減衰させた。

### 2.4 海浜流場の計算

海浜流場の計算では、波の遡上高に応じて汀線境界を移動し、2.3 で述べた方法により遡上域の水深を設定した。従来の海浜流計算では、摩擦係数を 0.01 程度の一定値として与えることが多いが、摩擦係数は一般的に波・流れの大きさにより異なるため、渡辺(1992)にならい田中・Thu(1993)の波・流れ共存場の摩擦則を用いて場所的に変化させた。この摩擦則は遷移領域を含む全ての flow regime に適用可能で、しかも陽形式近似されているので計算が容易である。摩擦項の評価に当たっては、底面剪断応力とその方向の時間変化を考慮して一周期間の平均的な摩擦力を評価すべきであるが、便宜的に最大剪断応力とその向きで代表させた。また、本研究では非定常計算により定常解を得ているが、繰り返し計算中、10 ステップに 1 回、流速の変化を考慮して摩擦係数を変更した。さらに、清水ら(1993)と同様、radiation stress 項はエネルギー平均波高と有義波周期、主波向から進行波として、水平拡散項は Longuet-Higgins (1970) の表示で、代表長さとして汀線および防波堤からの最短距離を用いて評価した。

### 2.5 地形変化の計算

地形変化の計算では、まず渡辺ら(1984)の局所漂砂量モデルを用い、漂砂の連続式により平面的な地形変化を計算する。清水ら(1993)と同様、波による漂砂量係数 $A_w$ は渡辺(1981)の波による漂砂量係数 $B_w$ との関係から地点毎に変化させた。 $B_w$ は、既往の研究成果を参考に、規則波実験に対しては7、現地あるいは実規模実験に対しては4とし、流れによる漂砂量係数 $A_c$ は $A_w$ の10倍に設定した。なお、底面剪断応力の評価には、海浜流場の計算と同様、田中・Thu(1993)の摩擦則を用いた。

汀線変化については、汀線平行方向の局所漂砂量フラックスを岸沖方向の測線毎に碎波点から遡上点まで積分して沿岸漂砂量の沿岸分布を求め、汀線変化モデルと同じ方法で計算した。汀線変化を表す漂砂の連続式の解法には陽解法を用いたが、数値計算上の安定条件の範囲内で繰り返し計算を行う際に、汀線変化による汀線平行方向の局所漂砂量フラックスの変化を考慮した。

平面地形変化と汀線変化の計算結果を合成する際には、汀線が後退する場合は平面地形変化の計算で水深変化が得られている最も岸側の点と汀線位置の間を線形補間した。汀線が前進する場合には特に補正は行わなかった。

## 3. 離岸堤設置海浜に対する水理実験結果による検証

### 3.1 水理実験の概要

離岸堤設置海浜に対する移動床水理実験結果(三村ら, 1982)を検証データとしてモデルの妥当性を検証した。水理実験は、長さ14m、幅7.5mの範囲に中央粒径0.2mmの砂を敷きならして作成した初期勾配1/20の一様勾配斜面に対して実施されている。入射波は5.7cm、0.9sである。最初にまず離岸堤を設置しない自然海浜に対して約12時間波を作用させた後、長さ1.5mの離岸堤を中央に設置し、波浪・海浜流場の計測とともに、約6時間後ならびに約12時間後に詳細な地形計測が行われている。離岸堤設置前に波による縦断地形変化がある程度進んでいるため、離岸堤設置後の地形変化は離岸堤背後に形成される海浜循環流による漂砂が支配的となることが期待されるので、波と戻り流れによる縦断地形変化を無視し、海浜流による漂砂のみを考慮した長期海浜変形モデルの検証を行うには好都合である。

### 3.2 検証計算の概要

本研究では、離岸堤設置直前の海底地形を初期地形として、離岸堤設置6時間後の地形変化の再現を試みた。波浪・海浜流場の計算は、海底地形変化の影響を適切に反映するため、20分毎に18ステップの繰り返し計算を行った。平面的な地形変化は各ステップをさらに5等分

し、4分毎に地形変化に伴う底面剪断応力の変化を考慮して、また汀線変化は汀線の変化に応じて3秒毎に汀線平行方向の漂砂量フラックスを変更し、繰り返して計算した。また、汀線変化を計算する際の移動高さは碎波水深に遡上高を加え10cmとした。なお、計算格子間隔は15cmである。

3.3 波浪・海浜流場の再現計算結果

図-2は、碎波波高の沿岸分布の計算値と実測値を比較した結果である。計算結果の方が離岸堤端部での波高減衰が急であるが、両者は概ねよく対応している。

次に、1ステップ目(初期地形)と17ステップ目(最終地形直前)の海浜流場の計算結果を図-3に示す。図中には静水汀線も示されている。離岸堤背後には左右にほぼ対称な海浜循環流が形成されており、汀線付近でみれば全体的に離岸堤背後に向かう方向である。また、17ステップ目で離岸堤背後にトンボロが張り出すと、離岸堤背後ではトンボロに沿って速い海浜流が発達し、実験と

同様、沖へ抜けるような一過性の流れに変化する様子が再現されている。しかしながら、離岸堤から離れたところでは、実験では戻り流れの影響と思われる沖向きの流れが観測されているが、計算ではそれが考慮されていない。

3.4 地形変化の再現計算結果

図-4は、3時間後と最終地形の計算結果ならびに実験の最終地形を示している。離岸堤背後にトンボロ地形が張り出す様子が汀線変化も含めて計算されているが、実験では水深4および6cmの等深線が循環流が離岸堤背後で沖へ向きを変えるところで左右にそれぞれ張り出しているのに対して、計算では3時間後の4cmの等深線にそのような傾向がみられものの、最終地形ではみられない。実験では、側壁と離岸堤のほぼ中央の循環流が岸に向かうところでは沖向きの張り出し地形が生じているが、計算でも定性的には再現されている。また、計算

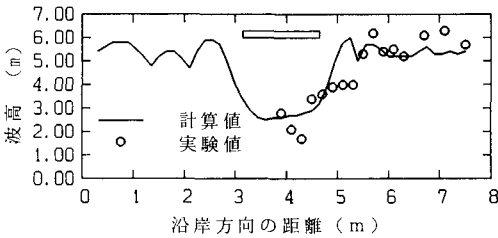


図-2 碎波波高分布の比較

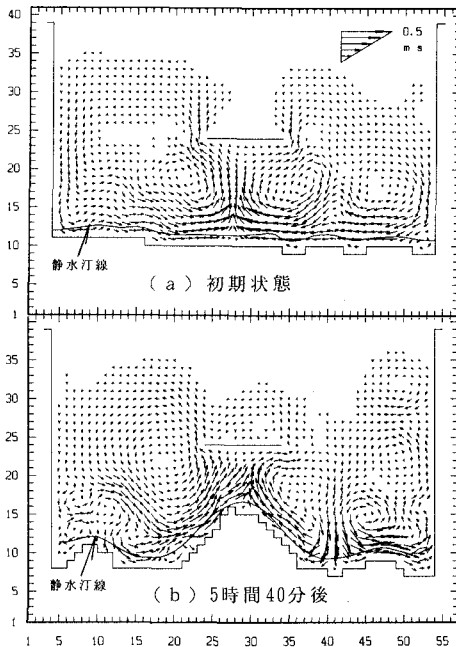


図-3 海浜流ベクトルの計算例

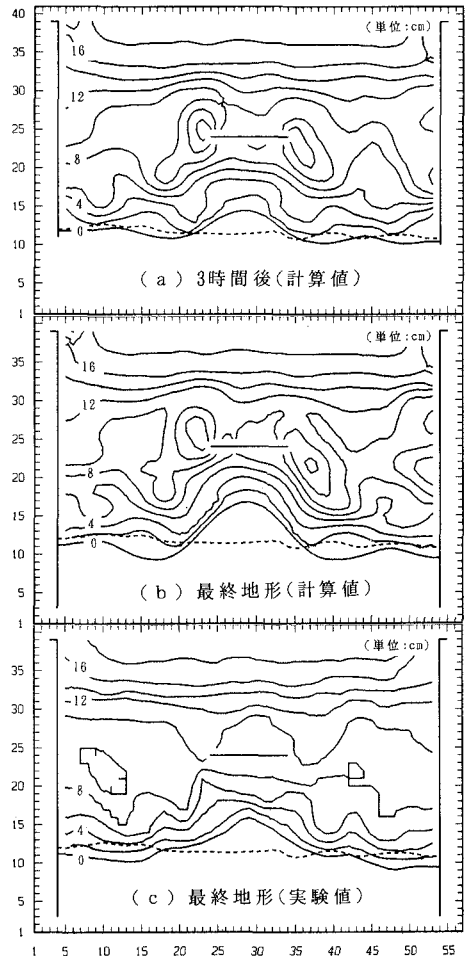


図-4 地形変化の再現計算結果

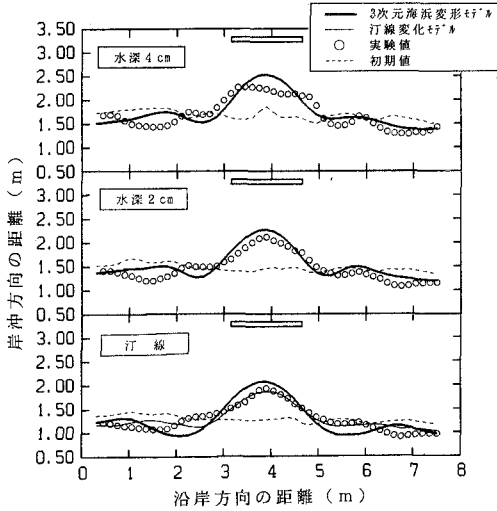


図-5 等深線位置の計算値と実測値の比較

では離岸堤端部付近で流れの剝離による侵食が実験に比べて極端に生じている。

図-5は、汀線、水深2および4cmの等深線位置の計算値を実験値と比較した結果を示している。汀線には、波高分布の影響を考慮できる小笹・Brampton(1979)の沿岸漂砂量公式を用いた場合の汀線変化モデルによる計算結果も併せて示されている。沿岸漂砂量公式の漂砂量係数  $K_1$  は三村ら(1982)と同様0.32、波高分布に起因する漂砂量を表す係数  $K_2$  は  $K_1$  の0.8倍とした。

汀線変化を考慮した3次元海浜変形モデルは、水深2、4cmの等深線変化のみならず、汀線変化についても離岸堤背後で汀線の前進をやや過大評価するものの、トンボロ地形が形成される様子がよく再現されている。

図-6は汀線と水深2cmの等深線変化の計算結果を

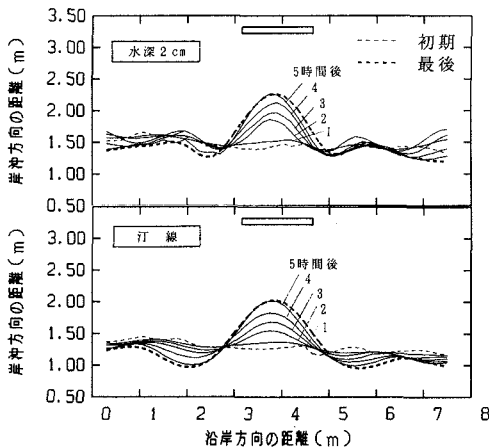


図-6 等深線位置の時間変化

1時間毎に示したものである。三村ら(1982)によれば汀線変化モデルでは1時間後にはほぼ最終地形に近づいているが、3次元海浜変形モデルでは1時間後には離岸堤背後でほとんど汀線が張り出さず、5時間後になってようやく平衡状態になる結果が得られている。汀線変化モデルでは汀線変化に伴う碎波波向の変化を通して平衡状態に達し、汀線に対して碎波波向がほぼ直角になると沿岸漂砂量がほぼゼロになることで平衡状態になる。これに対して3次元海浜変形モデルでは海底地形変化に伴う波浪・海浜流場の変化を通して平衡状態になり、汀線が張り出しすぎて起因力である radiation stress の勾配が小さくなって海浜流が弱くなるか、汀線に沿って平行な流れが生じて動的な平衡状態になるかのいずれかである。前者は汀線変化モデルで考慮されるメカニズムと同じで、いわば静的な平衡状態である。このように3次元海浜変形モデルでは動的な平衡状態も物理的な機構を介して評価できるため、地形の時間的な変化についても精度の高い予測が可能であると考えられる。

#### 4. モデルの現地適用性の検証

大洗港の建設途上における西防砂突堤沿いの地形変化を検証データとしてモデルの現地適用性を検討した。大洗港では南防波堤や沖防波堤の建設に伴い西防砂突堤沿いに顕著な堆積を生じた。検証期間は1981年3~12月の約9ヶ月間であり、図-7に示す計算範囲で計算した。検証期間中の波浪条件は、運輸省常陸那珂港の波浪観測記録に基づき、検証期間中の波高の出現頻度が同じになるよう、波高4段階(1.5、2.5、3.5、4.5m)、2つの時化で代表させたモデル時系列波浪に対して、合計18ステップの繰り返し計算を行った。また、汀線変化を計算する際の移動高さは碎波水深に遡上高さを加え、波高に応じ

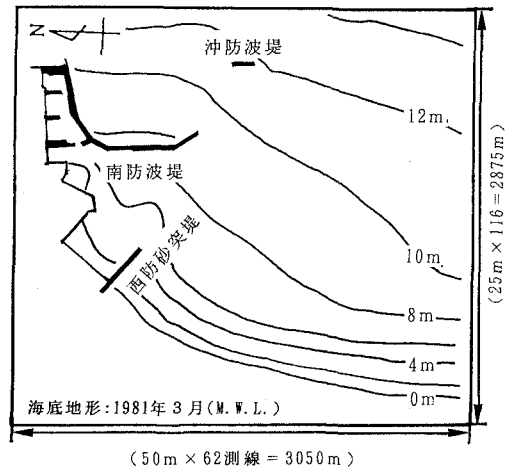


図-7 検証計算領域

て変化させた。なお、中央粒径は0.2 mmとした。

汀線ならびに水深5 mの等深線位置の変化の計算値と実測値の比較を図-8に示す。防波堤建設に伴う汀線付近の地形変化のみならず、西防砂突堤先端付近の顕著な堆積など、実際の地形変化を概ね精度よく再現できることが確認された。

また、汀線変化モデルとの整合性を調べることを目的として、海底勾配1/100の平行等深線海岸に30°斜め入射した場合のモデル計算を波高4段階行い、局所漂砂量フラックスを積分して得られる沿岸漂砂量とKomar・Inman (1970)の沿岸漂砂量公式による結果を比較した。沿岸漂砂量係数 $K_1$ は、波高によらずおよそ0.1となり、Komar・Inman (1970)の係数0.77に比べて小さいが、Krausら (1984)が大洗海岸に適用した値と同じで結果が得られた。

## 6. あとがき

本研究では、汀線変化も計算できるよう拡張した3次元海浜変形モデルを提案し、水理実験ならびに大洗港の実際の地形変化に対してモデルの適用性を検証した。汀線変化モデルと3次元海浜変形モデルの長所を組み合わせた実用的なモデルであり、砂浜海岸に構造物を建設した場合の構造物周辺の長期的な地形変化を予測する上で有効な手法となることが期待される。しかしながら、現在のところ固定直交座標で局所漂砂量を積分し、沿岸漂砂量を評価しているが、汀線変化が大きくなった場合には精度が悪くなる場合がある。また、最適な空間格子間隔や波浪・海浜流場の繰り返し計算時間間隔の設定など今後検討すべき課題も多く残されている。

なお、NOWPHAS (全国波浪情報網)の常陸那珂港波浪観測記録の入手にあたり運輸省港湾技術研究所永井紀彦海象調査研究室長に便宜を図って頂いた。また、大洗港の地形データは茨城県三浜港湾事務所 (現在、大洗港湾事務所)より提供を受けた。ここに記して深甚なる謝意を表する次第である。

## 参考文献

池野正明・鹿島達一・鶴飼亮行・清水琢三・秋葉徹・窪泰浩 (1994):

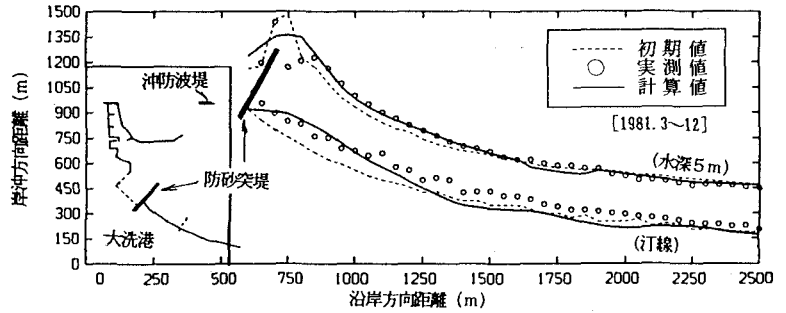


図-8 汀線と水深5 mの等深線位置の比較

多方向不規則波浪場計算法の人工島背後域への適合性比較, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 121-125.

磯部雅彦 (1986): 放物型方程式を用いた不規則波の屈折・回折・砕波変形の計算法, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 134-138.

小笹博昭・Brampton, A. H. (1979): 護岸のある海浜のてい線変化数値計算, 港研報告, 第18巻, 第4号, pp. 77-103.

合田良實 (1975): 浅海域における波浪の砕波変形, 港研報告, 第14巻, 第3号, pp. 59-106.

清水琢三・水流正人・嶋田昌義・窪泰浩・山田富朗 (1993): 取水港湾港口部の長期的な地形変化の再現, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 496-500.

田中 仁・A. Thu (1993): 全ての flow regime に適用可能な波・流れ共存場抵抗則, 土木学会論文集, 第467巻/II-23, pp. 93-102.

三村信男・清水琢三・渡辺 晃 (1982): 離岸堤による波浪・海浜流場の変化と海浜変形, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 299-303.

渡辺 晃 (1981): 海浜流と海浜変形の数値シミュレーション, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 285-289.

渡辺 晃 (1992): 局所漂砂量算定式による沿岸漂砂の総量と岸沖分布の検討, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 306-310.

渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・榊山 勉 (1984): 構造物設置に伴う三次元海浜変形の数値予測モデル, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 406-410.

Komar, P. D. and D. L. Inman (1970): Longshore sand transport on beaches, J. Geophys. Res., Vol. 75, No. 30, pp. 5914-5927.

Kraus, N. C., H. Hanson and S. Harikai (1984): Shoreline change at Oarai beach: past, present and future, Proc. 21st Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 2107-2123.

Longuet-Higgins, M. S. and R. W. Stewart (1970): Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to "surf beat", J. Fluid Mech., Vol. 13, pp. 481-504.

Longuet-Higgins, M. S. (1970): Longshore currents generated by obliquely incident wave, J. Geophys. Res., Vol. 75, No. 33, pp. 6778-6789.

Sunamura, T. (1984): Quantitative predictions of beach-face slopes, Geol. Soc. Am. Bull., Vol. 95, pp. 242-245.