

波と海浜流による 3次元海浜変形予測モデルの開発



鳥取大学工学部 黒岩正光

1. はじめに

我が国は四方を海で囲まれた島国で、砂浜海岸は波の猛威に晒され古くから海岸侵食に悩まされている。田中ら(1993)によれば、我が国の国土は年間160ha/年消失していると言われている。鳥取県においても、古くから漂砂による海岸侵食(皆生海岸)、航路埋没(網代港、泊漁港)や河口閉塞(由良川)などに悩まされてきた。昭和22年にこのような漂砂問題を解決すべく鳥取県に漂砂対策討委員会が設けられ、これから海岸工学という研究分野がスタートした。海岸工学では、漂砂、海浜変形の外力となる波や海浜流に関する研究、漂砂、海浜変形機構に関する研究が主であるが、さらに、侵食対策を施した後の海浜変形の将来予測、新たな港を整備したときの周辺の地形変化予測などが必要不可欠で、海浜変形予測に関する研究もさかに行われている。一般に、海浜変形予測手法は2つのタイプに大別される。ひとつは、沿岸漂砂による長期的な海岸線(汀線; 1ライン)の変化予測(最近では、等深線変化; nライン)、もう1つは波と海浜流による漂砂を考慮できる短期的な(中期的な)3次元海浜変形予測である。後者の方が、漂砂の移動機構を考慮できる有効なモデルと言われているが、計算時間がかかること、広範囲の計算が困難であることと、特に、汀線付近の地形変化予測が困難であるなどの短所がある。現場においては、取り扱い易さから前者のモデルが使用される場合が多いようであるが、構造物周辺の複雑な地形変化を予測することは困難である。いずれにせよ、これまでの予測モデルはそれぞれ短所長所を持っており、未だ確立されたモデルはなく研究途上にあるのが現状である。

著者は、1997年から鉛直分布を計算できる海浜流モデル(準3次元モデル)の開発を行い(黒岩ら,1997)、さらにその準3次元海浜流モデルをベースにした3次元海浜変形予測モデルの開発(黒岩ら,1999)に取り組んできた。2004年には、従来の3次元海浜変形モデルの短所のひとつを補う新たなモデル、汀線変化も計算可能な3次元海浜変形予測モデルを提案した(Kuroiwa *et al.*, 2004)。本報では、そのモデルの概要と計算例を示す。

2. 3次元海浜変形シミュレーションモデルの概要

著者が開発した海浜変形モデルは、図1に示すフローのとおりで、波浪場、海浜流場、漂砂量および地形変化計算の4段階に分けられる。以下、簡単にモデルの概要を述べる。

1) 波浪場の計算

波浪場は現地の波浪特性を考慮するために、間瀬ら(1999)の回折波を考慮した多方向不規則波のエネルギー平衡方程式

$$\frac{\partial S v_x}{\partial x} + \frac{\partial S v_y}{\partial y} + \frac{\partial S v_\theta}{\partial \theta} = \frac{\kappa}{2\omega} \left\{ (CCg \cos^2 \theta S_y)_y - \frac{1}{2} CCg \cos^2 \theta S_{yy} \right\} - \varepsilon_b S \quad \text{----- (1)}$$

を用いて計算される。式(1)中の S は波のエネルギー密度、 v_x 、 v_y および v_θ は特性速度、 C は波速、 Cg は群速度、 ε_b は砕波によるエネルギー減衰率、 ω は角周波数、 κ は波の回折の程度を表す係数である。

なお、座標系は沖から岸向（波の進行方向）に x 軸，それと直角方向（沿岸方向）に y 軸を取っている。

2) 海浜流場の計算

海浜流は黒岩ら（2002）の準3次元海浜流モデル，すなわち以下に示す運動方程式と連続式を有限差分法と有限要素法を併用する Fractional Step 法 (Koutitas *et al.*, 1980) を用いて解くことによって求められる。運動方程式；

$$\frac{DU}{Dt} = -g \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} - \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial R_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_h \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_h \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_v \frac{\partial U}{\partial z} \right) \quad \text{----(2)}$$

$$\frac{DV}{Dt} = -g \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial y} - \frac{\partial R_{yx}}{\partial x} - \frac{\partial R_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_h \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_h \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_v \frac{\partial V}{\partial z} \right) \quad \text{----(3)}$$

連続式；

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad \text{----(4)},$$

$$\frac{\partial \bar{\eta}}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{U}(\bar{\eta} + h)}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{V}(\bar{\eta} + h)}{\partial y} = 0 \quad \text{----(5)}$$

ここに， U, V および W は海浜流速， R_{xx}, R_{yy}, R_{xy} および R_{yx} は海浜流の起動力（波による過剰運動量フラックス）， v_h および v_v は水平および鉛直方向の渦動粘性係数， $\bar{\eta}$ は平均水位である。

3) 漂砂量の計算

全漂砂量は \bar{q} は波による掃流漂砂 \bar{q}_w ，海浜流（底面定常流速）による掃流漂砂 \bar{q}_{cb} および浮遊漂砂 \bar{q}_s の総和 $\bar{q} = \bar{q}_w + \bar{q}_{cb} + \bar{q}_s$ ----(6) で定義し，波および流れによる掃流漂砂量は渡辺ら（1984）のモデルを参考に，以下のように表す。

$$\bar{q}_w = A_w (u_*^2 - u_{*c}^2) \hat{u}_{wb} / g \quad \text{-----(7)}$$

$$\bar{q}_{cb} = A_c (u_*^2 - u_{*c}^2) \bar{U}_b / g \quad \text{-----(8)}$$

ここに， A_w および A_c は粒径の影響を考慮した漂砂量係数である。 A_c は A_w の定数倍（10倍程度）として表される。 u_*^2 は底面摩擦速度， u_{*c}^2 は限界摩擦速度， \hat{u}_{wb} は波の底面水粒子速度の最大値， \bar{U}_b は海浜流の底面流速である。浮遊漂砂は，式(9) すなわち鉛直一次元浮遊砂濃度分布 c と海浜流の鉛直分布 \bar{U} との積を底面から平均水位面まで積分することによって算定される。

$$\bar{q}_s = \int_{-h}^{\bar{\eta}} c \bar{U} dz \quad \text{-----(9)}$$

汀線の変化も計算するためには，遡上域の漂砂量も見積もる必要があるが，簡単のため，遡上域における漂砂量は，Larson ら（1989）の SBEACH モデルを参考に，汀線付近の漂砂量を最大遡上高さで外挿して算定している。

4) 地形変化

地形変化（水深と汀線の変化）は式（10）に示す渡辺ら（1984）の漂砂の連続式を用いて計算している。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(q_x + \varepsilon_s |q_x| \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(q_y + \varepsilon_s |q_y| \frac{\partial h}{\partial y} \right) \right\} \quad \text{-----(10)}$$

以上4つプロセスを経て地形変化を計算するが，波，流れと地形変化の相互作用，入射波の波高，周期，波向の時間的变化などを考慮するため，ある程度地形が変化した後，地形データを更新して波と流れの計算を再度行い，再現したい時間が経過するまで（予測したい最終地形が得られるまで），1)～4)の計算を繰り返す。紙面の都合上，モデルの概要と計算の流れを大雑把に示したが，詳細は参考文献を参照し

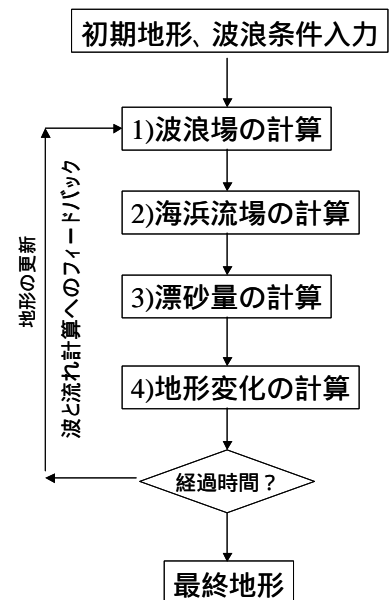


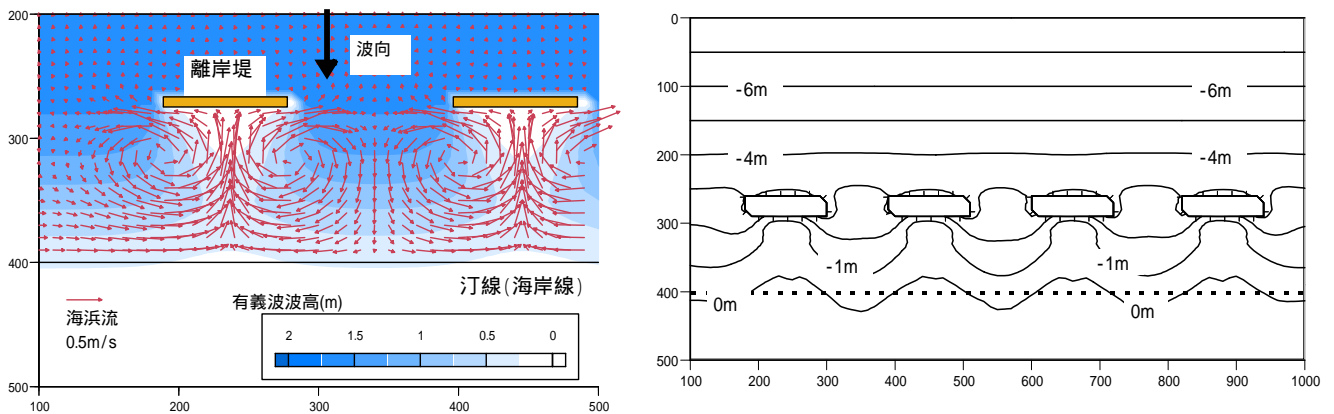
図 1 計算のフロー

ていただけたら幸いです。

3. 海岸構造物周辺の3次元海浜変形解析例

1) 離岸堤周辺の海浜変形計算例

まず、長さ100mの離岸堤を4基設置した場合の計算例を図2に示す。波浪条件は有義波波高1.5m、周期7.0s、多方向不規則波である。海底砂の中央粒径は $d_{50}=0.25\text{mm}$ としている。図2(a)は有義波波高分布と海浜流のベクトルを示したもので、離岸堤周辺では波高の減衰と波の回折が計算されている。また、離岸堤背後では、循環海浜流が計算されている。図2(b)は地形変化の計算例で、汀線の変化量(前進量)は少ないが、離岸堤背後に形成される特有の舌状砂州が形成されていることがわかる。



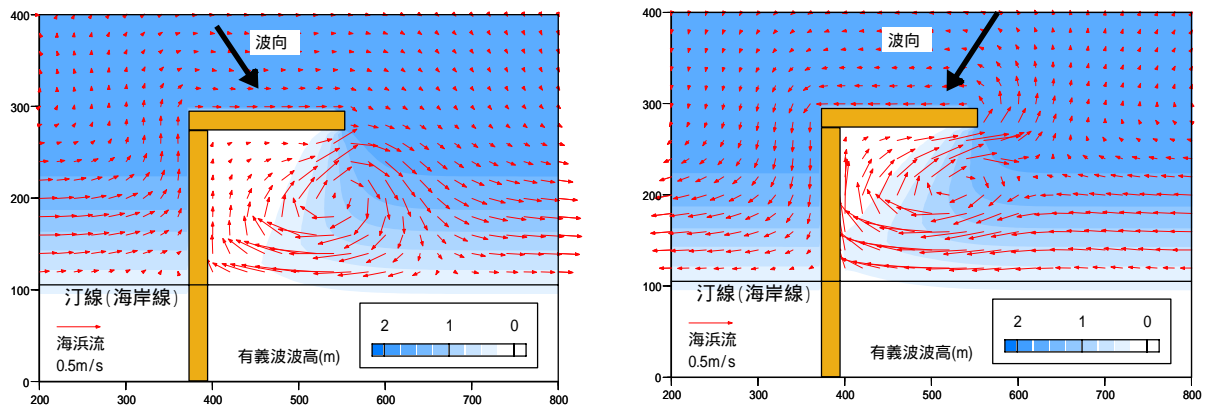
(a)波高分布と海浜流ベクトル

(b)60日後の地形変化

図2 離岸堤周辺の地形変化の計算例 ($H_{1/3} = 1.5\text{m}$, $T_{1/3} = 7.0\text{s}$)

2) 構造物の遮蔽域における海浜変形計算例

図3および4は、構造物遮蔽による典型的な海浜変形計算例を示したものである。各図の(a)および(b)はそれぞれ波向き $\theta = 20^\circ$ および $\theta = -20^\circ$ の場合を示している。図3から波向き 20° の場合は図中左から右に向かう沿岸流、構造物の背後では時計回りの循環流が形成されている。一方、 -20° の場合、左向きの沿岸流が発生している。構造物背後では、 20° の場合と同様に時計回りの循環流が形成されているが、流況が若干異なっている。



(a)波向き $\theta = 20^\circ$

(b)波向き $\theta = -20^\circ$

図3 有義波波高分布と海浜流ベクトル ($H_{1/3} = 1.5\text{m}$, $T_{1/3} = 7.0\text{s}$)

図 4 の海浜変形の計算結果から，両ケースとも構造物背後の堆砂と汀線の前進，構造物より右側において海浜循環流の影響による汀線の後退が見られ，遮蔽域形成による循環流とそれに伴う典型的な地形変化がシミュレートされている．

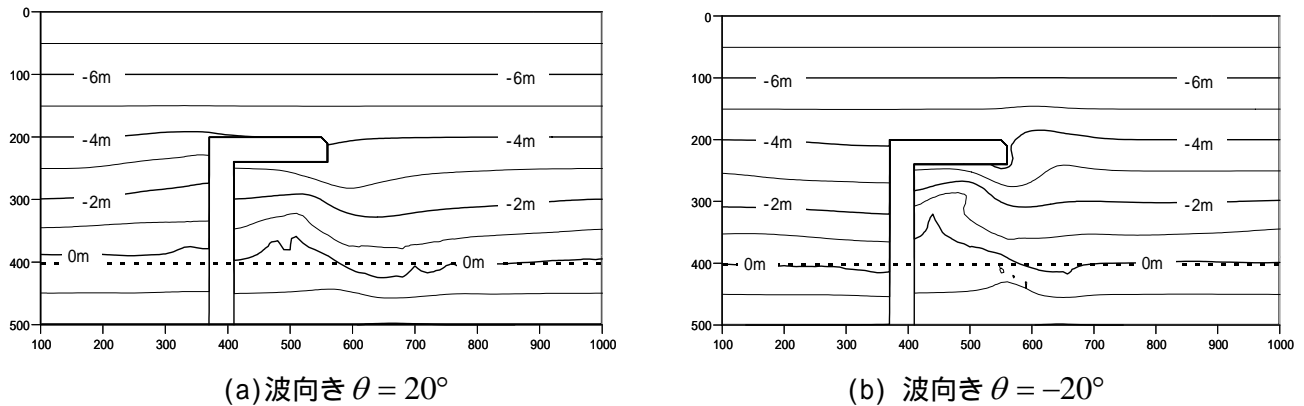


図 4 60 日後の地形変化 ($H_{1/3} = 1.5m$, $T_{1/3} = 7.0s$)

3) 現地適用例 (Kuroiwa et al., 2004)

北海道内浦湾内にある国縫漁港建設に伴う海浜変形事例 (清水ら, 1996) へ適用を試みた結果を図 5 に示す．国縫漁港は離岸型「島式漁港」で，港の形状からワイングラス型とも呼ばれている．本計算では，漁港建設に伴う 1 年後の地形変化を再現した．図(a)が 1 年後の実測された等深線図で，(b)が計算結果である．実測値と同様に構造物背後に舌状砂州の形成が再現されているが，実測値に対して汀線の前進量が少なく，また周辺海域の地形変化も異なっている．このように，現段階では定量的な検討は困難であるが，定性的には，汀線変化も含めた 3 次元の予測が可能であることがわかる．

4. 混合粒径砂への拡張 (黒岩ら, 2005)

最後に，混合粒径砂の分級作用を考慮した 3 次元海浜変形予測モデルによる計算例を示す．一般に現地海浜は，様々な粒径の底質で構成されており，地形の変化に伴い粒度の分級が発生する．新たな試みとして，粒度変化も考慮した 3 次元海浜変形予測モデルの開発にも取り組んでいる．なお，モデルの詳細は黒岩ら (2005) を参照していただき，本章では，計算例のみを示す．

図 6 は岸沖漂砂による沿岸砂州の形成に関する模型実験結果と比較した結果である．実験は中央粒径 0.7mm と 0.3mm の底質を 3 : 7 (0.7mm の底質の含有率が 0.3, 0.3mm の底質の含有率が 0.7) で混合されたものを用いている．波浪条件は沖波波高 8.5cm, 周期 1.0s の規則波である．図(a)は 20 時間後の各粒径の含有率岸沖分布を示したもので，図(b)は 20 時間後の断面地形を示したものである．沿岸砂州が形成されているところでは，0.3mm の含有率が大きくなっている (細粒化)．一方，汀線が後退している (侵食されている) ところでは，0.3mm の含有率が小さくなっている (粗粒化)．図 - 7 は離岸堤周辺の地形変化計算を試みた一例である．初期の底質は中央粒径 0.4mm と 0.1mm を 1 : 1 で混合されたものを想定

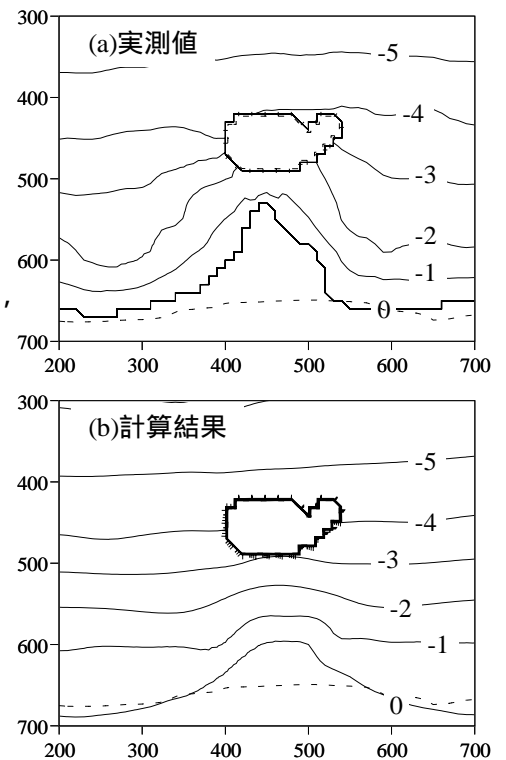


図 5 現地における海浜変形予測の適用例 (1 年後)

している．図(a)は地形変化，(b)は離岸堤背後 ($x = 300\text{m}$, 400m , 500m) の平均粒径の沿岸分布を示している．離岸堤背後における堆積域 (舌状砂州の形成域) では粒径が小さく細粒分が増加し，離岸堤両端の侵食域では粒径が大きく粗粒分が増加している．地形変化とともに，混合砂の分級がシミュレートされていることがわかる．

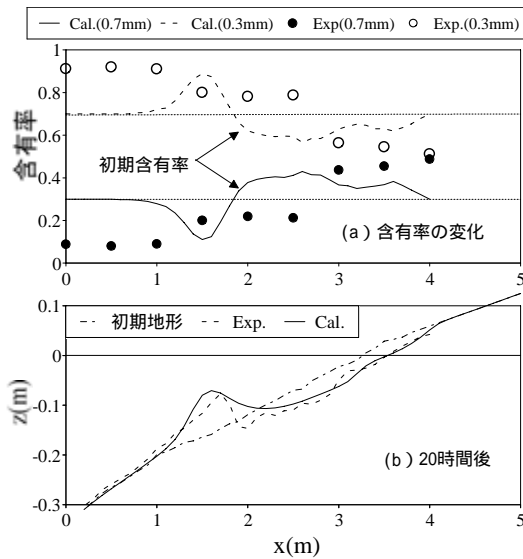


図 6 混合粒径砂による縦断地形変化

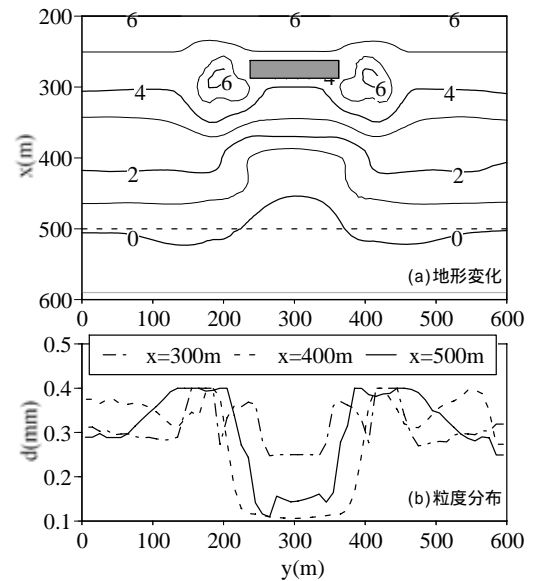


図 7 混合粒径砂による離岸堤周辺の地形変化 ($H_{1/3} = 2.0\text{m}$, $T_{1/3} = 7.0\text{s}$)

5. おわりに

3次元海浜変形モデルについては，我が国だけでなく，欧米でもそれぞれ独自のモデルが提案され，商用して一般に公表されているもの（例えば，DELFT3D（オランダ），MIKE21（デンマーク）など）もある．しかしながら，未だ海浜変形予測モデルは開発途上にあり，確立されたモデルは無いといっても過言ではない．当方で開発中のモデルもまだ改良の余地が残されているが，鳥取県における海岸保全を行っていくためのツールとして貢献できれば幸いである．最後に，本研究は，これまでの海浜変形モデルの開発においては，日本建設コンサルタント(株)より，研究助成金を受けて実施したことを付記しておく．

参考文献

- 黒岩正光・野田英明・芳地康征 (1997): 準3次元海浜流場の数値シミュレーションに関する研究，海岸工学論文集，第44巻，pp.151-155，
- 黒岩正光・野田英明・孫 彰培・加藤憲一・谷口 丞(1999): 準3次元海浜流モデルを用いた構造物周辺の3次元海浜変形予測に関する研究，海岸工学論文集，第46巻，pp.616-620
- 黒岩正光・口石孝幸・加藤憲一・松原雄平・野田英明(2002): 多方向不規則波浪場における準3次元海浜流場と海浜変形予測に関する研究，海岸工学論文集，第49巻，pp.491-495
- 黒岩正光・口石孝幸・加藤憲一・松原雄平・野田英明・中本良平 (2005): 混合粒径砂の分級と汀線変化を考慮した3次元海浜変形予測モデル，海岸工学論文集，第52巻，印刷中
- 清水琢三・山田晶子・内山一郎・渡辺 晃(1995): 汀線変化を考慮した3次元海浜変形モデルの現地適用性，海岸工学論文集，第42巻，pp.606-610.
- 田中茂信・小荒井衛・深沢 満 (1993): 地形図の比較による全国の海岸線変化，海岸工学論文集，第40巻，pp.416-420
- 間瀬 肇・高山知司・国富将嗣・三島豊秋 (1999): 波の回折を考慮した多方向不規則波の変形計算モデルに関する研究，土木学会論文集，第628号， -48， pp.177-187．
- 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・榊山 勉(1984): 構造物設置に伴う3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.
- Koutitus, C. and O'Conner, B. (1980): Modeling Three-dimensional wind-induced flows, ASCE, HY11, pp.1843-1865
- Kuroiwa, M., J.W. Kamphuis, T. Kuchiishi, Y. Matsubara and H. Noda (2004): Medium-term Q-3D coastal area model with shoreline change around coastal structures, Proceedings of the 29th International Conference on Coastal Engineering, pp.2194-2206.
- Larson, M and N.C. Kraus, N.C. (1989): SBEACH: Numerical model for simulating storm-induced beach change, Report 1, Empirical foundation and model development, Technical Report CERC-89-9, US Army Engineering Waterways Experiment Station, CERC