

底質粒径の時空間変化を考慮した海浜変形予測について

山下隆男*・林 健太郎**・朴 珪昱***

底質粒径の時空間変化を考慮して海浜変形を予測する必要がある例として、河口海岸での海浜変形特性を検討した。仁淀川の河口海岸のデータを用いて、複合海浜断面形状が存在することを示した。また、これは Dean の平衡海浜断面形で再現でき、簡易ボーリングの結果から、粗砂の細砂下への潜り込みによる細粒化機構が存在する可能性を示した。また、底質の細粒化現象が海岸侵食を助長する機構を海浜断面変化シミュレーションモデル、SBEACH で再現する方法を提案した。さらに、複合海浜断面形状の河口海浜を保全するための考え方を述べた。

1. 緒 言

わが国の海岸の多くは、いわゆる河口デルタ海岸で、河川と海岸とは、物質輸送、流送土砂を通して極めて直接的な関係にある。特に、河口海岸の地形変化に着目した場合には、河川からの土砂供給による底質粒径の時空間変化の影響を十分考慮する必要がある。すなわち、河口部では河口テラスに溜まった土砂が波と流れによって海岸に再分配される過程（広域海浜流による漂砂過程）と河口から砕波帯を通して直接沿岸域に運ばれる過程（掃流状態での漂砂過程）とがある。前者は粒径が数 mm 以下の底質の輸送特性に対するもので、後者は数十-数百 mm の粗い粒径の底質の輸送で砕波帯における掃流漂砂が卓越すると考えられる。河口デルタ海岸の海浜変形には、この 2 種類の底質の運搬機構を考慮することが重要であろう。たとえば、河口導流堤や、河口港の防波堤建設は後者の粗粒砂の輸送を完全に阻止する可能性があり、建設後、粗粒成分の供給が断たれると、周辺海岸の底質の細粒化が進行し、海岸侵食が助長されることは、わが国の多くの河口海岸で認識されてきている。

本研究は、主として仁淀川の河口海岸を例として、このような海岸の侵食機構について検討する。さらに、このような海浜を保全するための考え方を示す。最後に、底質の細粒化現象が海岸侵食を助長する機構を海浜断面変化シミュレーションモデル、SBEACH で再現する方法を提案する。

2. 河口海岸の地形的特性

ここでは、国土交通省四国地方整備局高知河川国道事務所が仁淀川河口海岸で実施した調査結果を借用して、河口海岸の海浜断面形状と底質の岸沖分布特性とから、複合平衡海浜断面形状が存在することを示す。図-1 に仁淀川河口海岸における、高知河川国道事務所の調査の測点・測線位置と番号を示す。

(1) 複合海浜断面形状

わが国の河口海岸、特に太平洋沿岸の河口海岸での調査結果には、図-2 に示す仁淀川の例のような複合海浜平衡断面形状が多く見られる。このような海岸における海浜断面形状と底質粒径の岸沖方向分布をみると、常時波浪の砕波点である水深約 5 m 以浅の粗粒砂（粒径 2 ～15 mm）が形成する平衡海浜断面と、それ以深に広がる細粒砂（0.2～0.5 mm）が形成する断面形状との複合型となっている。おそらく、細粒砂が蓄えられた海浜では底質は波浪および海流、広域海浜流の共存外力場で輸送され、平行等水深線の手前を形成するのであろう。また、水深約 5 m 以浅の粗粒砂域においては、主として波浪を外力とした掃流漂砂による前浜地形が形成されているのであろう。その間には、波浪や漂砂供給状態によってスケールは異なるが、バーやトラフ、ステップ地形が形成される。この領域は、バッファー領域で、この領域が狭くなればなるほど、侵食性の波浪、海浜流に対して脆弱な海浜となっていると見なすことができる。

ここでは、前述の高知河川国道事務所が仁淀川河口海岸で実施された調査データを借用して、複合安定海浜断面形状が形成されている状況を調べてみる。平成 7 年の深淺測量データと海底面上の底質粒径データとから、測点 30-0（図-2 参照）の海浜断面で調査された安定海浜を、次式で示される Dean (1977) の安定海浜断面形状に当てはめてみる。

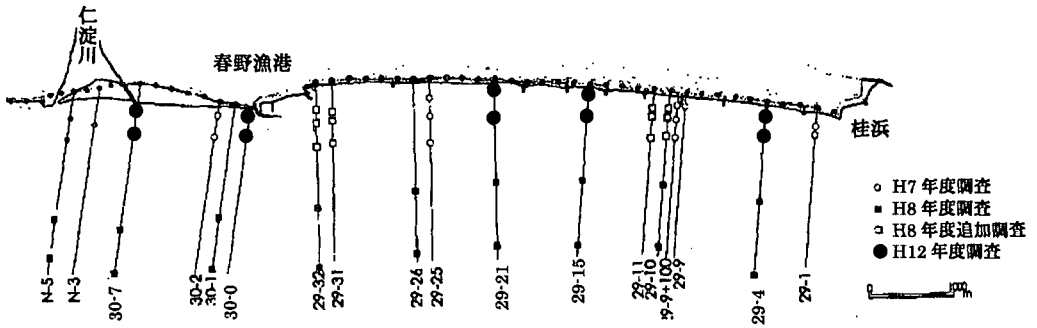
$$h(x) = A(d_{50})x^{2/3} \dots\dots\dots (1)$$

前浜部の中央粒径を $d_{50}=5$ mm とし、それに直結する海浜のそれを $d_{50}=0.25$ mm として、複合海浜断面形状を計算し、調査データと比較すると、図-3 に示すように、式 (1) の海浜断面形状で極めてよい近似で再現される。

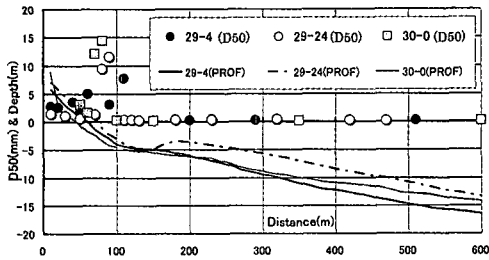
(2) 河口海岸における海浜断面地形、底質粒径の空間変化

仁淀川河口左岸の海浜を対象として、海浜断面地形、底質粒径の空間変化を検討する。この海岸は、河口テラス、河道での砂利採取により周辺海岸に侵食問題が発生した点、河口砂州が発達する海岸である点、河口部に漁港が建設され、下手側への漂砂（主として水深約 5 m 以

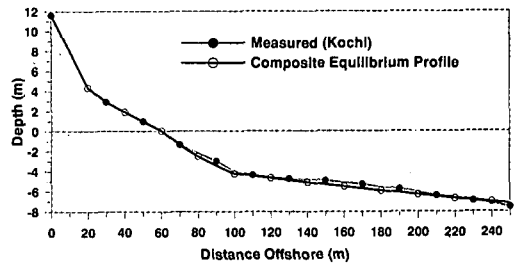
* 正会員 博(工) 京都大学助教授 防災研究所
** オールド・ドミニオン大学大学院 工学研究科
*** 工 修 京都大学大学院 工学研究科



図一 仁淀川河口海岸における測点・測線位置



図二 河口海岸に見られる複合海浜断面形状 (仁淀川の例)



図三 仁淀川河口海岸の測点30-0で再現された複合平衡海浜断面形状

浅の粗粒成分)が遮断された海岸であり、熊野川河口の七里御浜海岸等、太平洋沿岸の多くの河口海岸に共通する点を有している。

この海岸では、平成7, 8年と平成12年に、図一に示す箇所で、パイプレーションコアサンプラーによる簡易ボーリングが実施されている(日本ミクニヤ株式会社)。また、平成7年には前浜、後浜の底質調査も実施されている。さらに、平成2年から平成14年の長期、年1回の深浅測量が継続して実施されており、河口海岸の時空間的变化を検討するために資料が整っている。

図一4は測点29-4(桂浜よりの河口デルタ終点部)、29-15, 29-21(最も海浜変化の大きい箇所でホットスポットの存在が指摘されている測点)、29-25(春野漁港から約1km下手側の海岸)、30-0(春野漁港の直上手側海岸で漁港防波堤に沿った測線)、および30-7(仁淀川左岸の旧導流堤に沿う測線)における、調査結果をまとめて示したものである。

これらの図から判断されるこの海岸の海浜断面地形および底質粒径の空間変化特性を、以下にまとめて示す。

(a) 平成2年頃には、河口テラスの特性であるステップ状の地形特性が顕著に見られる。ステップ地形の広さは河口から遠のくに従って狭くなる。桂浜近くの測点29-4では約100m、測点29-15では約150m、測点29-21および30-0では200m以上である。

(b) 前浜の底質の中央粒径は、漂砂下手側に行くにし

たがって小さくなる。測点30-0で4-15mm、測点29-24で2-12mm、測点29-4で2-8mmである。

(c) 外浜での中央粒径は逆で、漂砂下手側に行くにしたがって大きくなっているようである。測点30-0で0.07-0.18mm、測点29-24で0.11-0.4mm、測点29-4で0.15-0.5mmである。

(d) 水深5-6m、および水深10mでの簡易ボーリング結果からは、表層底質の中央粒径が0.1-0.5mmである箇所においても、その下方に礫混じりの層が存在する。海底下の底質の堆積過程を類推することは容易ではないが、表層から高々2mまでの堆積層を考えているので、近年の高波浪時に一度は混合作用を受けている層であると仮定すると、前浜の粗粒径の底質が混合過程によって沈み込んだものではないかと推測される。図一4(b)~(f)においては、平成2年から平成12年までの毎年の海底地形の計測結果を併記しているの、侵食が必ずしも一方的ではなく、変動範囲内に底質採取点があることがわかる。このことから、地質年代での堆積過程というよりは、近年の過程により形成された礫の混合層であると考えられる。すなわち、高波浪時に、前浜から流出した礫が堆積しているのであろうと考える。

(e) 図示していないが、図一4で示したボーリング点AおよびBより沖側の、水深15m、20m、25mにおいても平成7, 8年度に同様の調査が行われており、この結果からは、海底下2mの地層に礫は検出されてい

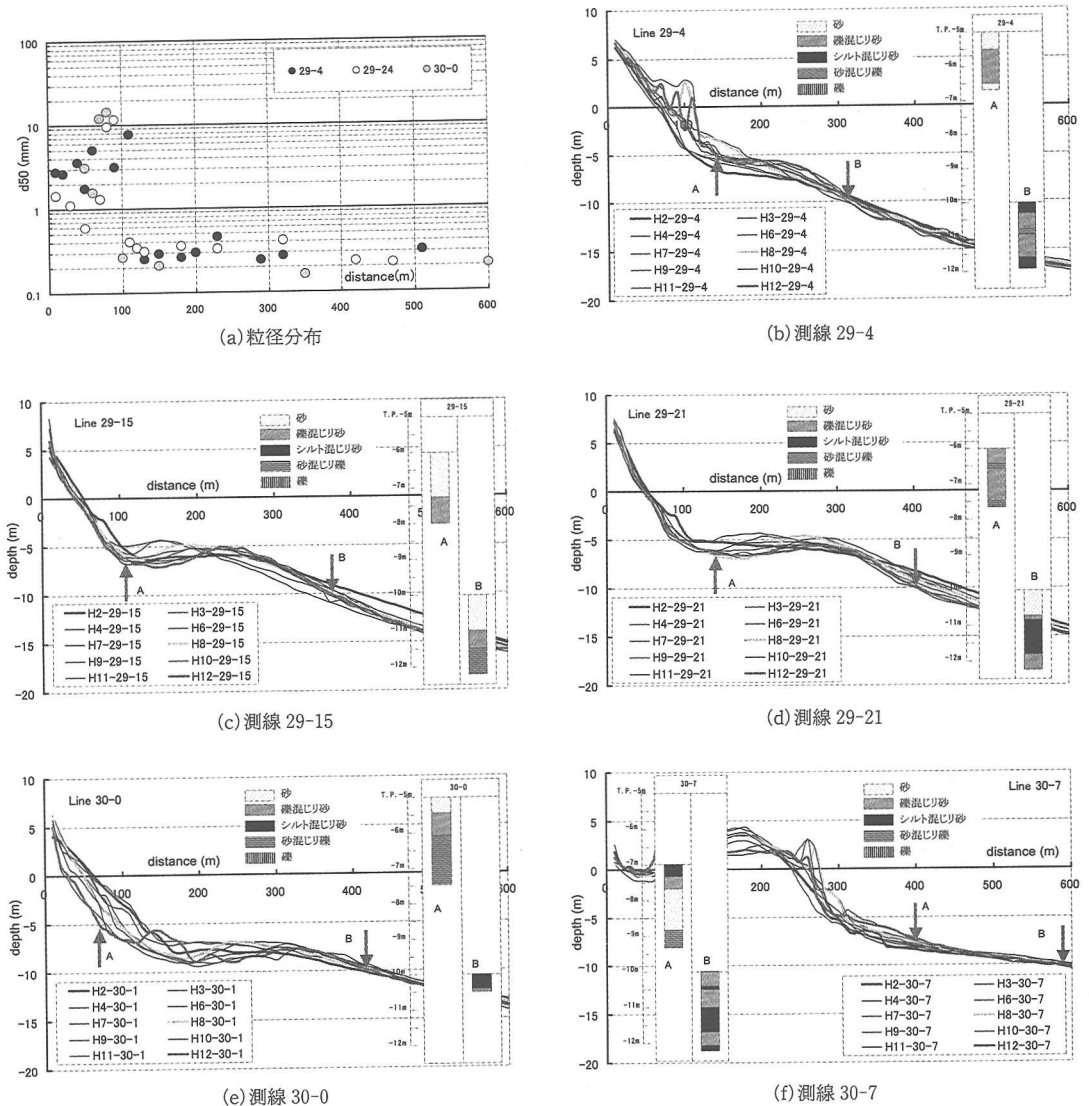


図-4 高知海岸の粒径分布, 海浜断面とボーリングデータ

い。このことは、馬場ら (2002) が指摘しているように、高波浪時に発生する undertow の影響範囲は水深 10 m 程度で、15 m 水深ではその影響は全く見られないことと一致する。

(3) 大湊海岸でのボーリング調査

高知海岸で計測された簡易ボーリングによる海岸底質の柱状データからは、水深 5~6 m 地点の海底下 1~2 m 層に厚さ約 1 m の礫層が存在するケースが多く見られる。これは、高波浪時に砕波帯内を沖方向に移動した粗粒砂が海底に残された履歴を示すものであると推測される。すなわち、高波浪時に砕波帯内の戻り流れが強化された状態で、粗粒砂と細粒砂とが交わる領域で混合層が形成され、ストーム通過後に混合層内で細粒砂成分が

上、粗粒砂が下となる層状化を起こすと仮定する。

これを他の海岸でも確かめるため、日本海側の上越・大湊海岸においても同様の柱状ボーリングを行った。この海岸は直江津港の港湾防波堤の延伸に伴って海岸侵食が進行した、関川河口デルタ海岸で、侵食に伴う砂礫の細粒化が生じた典型的な侵食海岸である。図-5 に 1999 年から 2002 年までの 2 月に計測された海底断面地形、ボーリング箇所 (6 本) およびコアの写真を示す。また、図-6 にはコアサンプルの中央粒径の深度方向分布を示す。これらによると、顕著な層状の粗粒砂層は存在していないが、混合層内で層状堆積が認められ、混合層の厚さは 80~100 cm であろうと推定される。

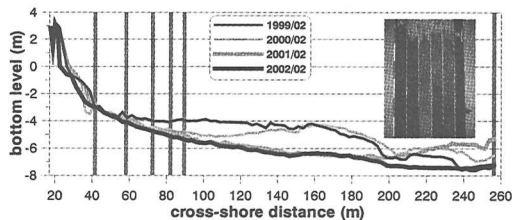


図-5 大湊海岸海浜断面とボーリング調査地点及びコアサンプル

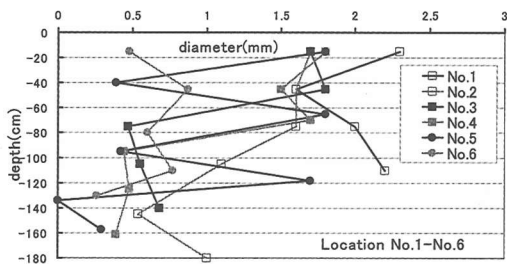


図-6 コアサンプルの中央粒径の深度方向分布

3. SBEACH による海浜断面変化のシミュレーション

ここでは、SBEACH (Storm-induced BEACH Change) モデルに複合海浜断面形状特性、および混合層での粗砂の潜り込み特性を考慮することを試みる。SBEACH は平衡海浜断面形状へ帰着するように碎波帯内での定常断波のエネルギーフラックス分布が漂砂量を定めるモデルで、bar, trough, berm 等の形成や移動を含めた海浜断面形状の変化を予測する断面二次元モデルであり、大型水理模型実験からのデータを基にしており、自然海浜での観測、調査のデータからその検証を行ったモデルである。

Wave モデルは線形波理論を基にしており、深海あるいは沖のある水深のところから碎波点までの波の特性を決定することに線形波理論を適用して行っており、碎波点の岸の方はわずかに一般化された形式の Dally ら

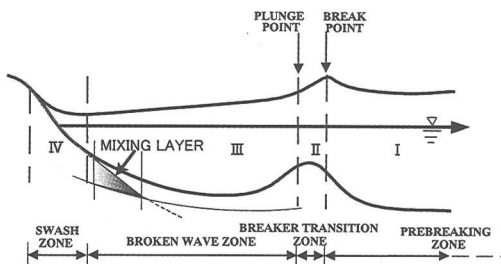


図-7 SBEACH の計算領域

(1984, 1985)の波浪減衰モデルにより波高分布を計算する。

碎波帯の内と外での漂砂移動関係の相違を外浜内での波の力学とさまざまな流れの条件下での漂砂移動の物理的特性に基づいて図-7 のような、4 領域に断面分割をしている (Larson ら, 1988; Larson・Kraus, 1989)。すなわち、領域Ⅰ：砂移動の有効な沖方向水深から碎波点まで (prebreaking zone), 領域Ⅱ：碎波点から plunge point まで (breaker transition zone), 領域Ⅲ：plunge point から遡上帯まで (broken wave zone), および領域Ⅳ：遡上帯の岸方向境界から打ち上げの岸方向限界まで (swash zone) である。

各領域での漂砂量を求める漂砂量式は次のようである。

$$\text{I} : q = q_b e^{-\lambda_1(x-x_b)} \quad x_b < x \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{II} : q = q_b e^{-\lambda_2(x-x_p)} \quad x_p < x \leq x_b \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{III} : q = \begin{cases} K \left(D - D_{eq} + \frac{\varepsilon}{K} \frac{dh}{dx} \right) & D > D_{eq} - \frac{\varepsilon}{K} \frac{dh}{dx} \\ 0 & D < D_{eq} - \frac{\varepsilon}{K} \frac{dh}{dx} \end{cases} \quad x_z < x \leq x_p \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{IV} : q = q_z \left[\frac{x - x_r}{x_z - x_r} \right] \quad x_r < x \leq x_z \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 q : net 岸沖漂砂量 (m^3/ms), $\lambda_{1,2}$: 領域Ⅰ, Ⅱでの空間的減衰係数 ($1/\text{m}$), x : 岸沖方向座標 (m), q_b : 漂砂量係数 (m^4/N), D : 単位体積あたりの波のエネルギー消散率 ($\text{Nm}/\text{m}^3\text{s}$), D_{eq} : 単位体積あたりの平衡エネルギー消散率 ($\text{Nm}/\text{m}^3\text{s}$), ε : 勾配関係漂砂量係数 (m^2/s), h : 水深 (m) で、下付の b, p, z, r は碎波点, plunge point, surf zone の終点, 遡上限界 (run-up limit) を、それぞれ示している。領域Ⅰ, Ⅱでの沖方向の減衰率は次式が適用される。

$$\lambda_1 = 0.4 \left[\frac{D_{50}}{H_b} \right]^{0.47}, \quad \lambda_2 = 0.2 \lambda_1 \dots\dots\dots (6)$$

境界条件は遡上限界と砂が動き始める沖のある水深のところで 0 である。計算格子の沖側境界 (限界水深) は領域Ⅰで指数的減衰により決定される。波高分布は与えられた時間ステップにおいて岸沖方向に計算されるため異なる砂移動領域間の境界の位置は決定される。碎波点の位置は波高計算により直接与えられ, plunging point は $3H_b$ により計算される (Galvin, 1969; Svendsen, 1987)。碎波帯の岸側境界は前浜の傾斜面と与えられた粒径に対する平衡断面間の接触点で決定される。遡上限界は大型水槽データから得た active profile height を予測するための式から求められる。

$$Z_R = 1.47 \xi^{0.79} \dots\dots\dots (7)$$

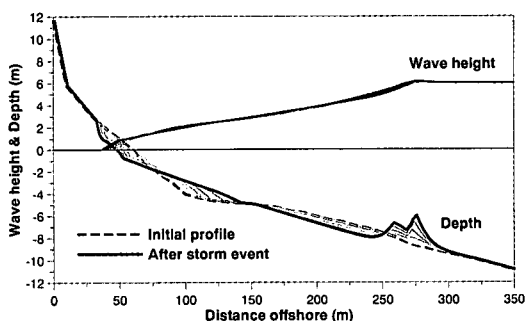


図-8 細粒化による汀線後退機構の再現計算

ここで、 ξ は surf similarity parameter である。

粗砂の潜り込みによる底質の細粒化をシミュレーションするため、粗、細砂による複合平衡海浜断面を考え、この領域でのパラメータ $A(d_{50})$ を別々に与え、両海浜断面が交差する領域において混合層を考え、ここで粗砂が細砂に置き換わる操作を入れた。混合層厚は $\delta = aH^2$ ($a = 0.2$) とした。

周期 10 s、波高 5 m の高波浪が連続的に図 3 で示す高知海岸を模擬した複合平衡海浜断面に作用し、混合層で粗砂、細砂交換が発生すると仮定した場合の計算結果を図-8 に示す。これより細粒化により、汀線が約 20 m 後退することが再現される。

4. 河口海岸の海岸保全について

複合海浜断面形状において、高波浪時の粗・細粒砂の鉛直移動機構を考えると、河口からの沿岸漂砂による粗粒砂の供給が断たれた河口海岸においては、底質の細粒化が進行する。細粒化が進行すれば、海浜勾配の緩やかな平衡海浜断面形状へと移行するため、汀線後退が助長される。このような汀線後退速度は遅いと考えられるが、高知海岸の測線 30-0 の海浜断面変化にはこのような侵食特性が見受けられる。河口海岸に河口導流堤や、防波堤を建設したことによる海岸侵食対策を検討する場合、侵食速度が速いため、人工リーフや離岸堤に頼りがちであるが、河川からの土砂供給を考慮すると、養浜またはサンドバイパスによる工法を併用することが望ましい。このような場合に、粗砂の量と質をどのように決め、高波浪時の粗砂の潜り込みによる底質の細粒化をどのように抑制するかを検討する必要があると思われる。例えば、複合海浜断面形状の接続線上に、連続堤に近い人工リーフ（天端幅は広くなくても良い）を設置し、その背後に

粗砂を養浜する工法等は検討に値する。

5. 結 語

仁淀川の河口海岸のデータを用いて、複合海浜断面形状が存在することを示した。また、これは Dean の平衡海浜断面形で再現でき、簡易ボーリングの結果から、粗砂の細砂下への潜り込みによる細粒化機構が存在する可能性を示した。また、底質の細粒化現象が海岸侵食を助長する機構を海浜断面変化シミュレーションモデル、SBEACH で再現する方法を提案した。さらに、複合海浜断面形状の河口海浜を保全するための考え方を示した。

なお、本研究では、国土交通省四国地方整備局高知河川国道事務所の調査データの提供を受けた。また、水工技術研究会（今本博健会長）の平成 15 年度水工技術研究会研究助成を受けたことを記し、各機関および関係諸官に謝意を表する。

参 考 文 献

- 馬場康之・加藤 茂・山下隆男 (2002): 冬季季節風による広域海浜流一上越・大湊海岸を例として一(現地観測結果), 海と空, 第 78 巻, 第 2 号, pp. 59-66.
- Dally, W. R., R. G. Dean and R. A. Dalrymple (1984): A model for breaker decay on beaches, Proceedings of the 19th Coastal Engineering Conference, American Society of Civil Engineers, pp. 82-98.
- Dally, W. R., R. G. Dean and R. A. Dalrymple (1985): Wave height variation across beaches of arbitrary profile, Journal of Geophysical Research, Vol. 90, No. C6, pp. 11917-11927.
- Dean, R. G. (1977): Equilibrium beach profiles: U. S. Atlantic and Gulf coasts, Department of Civil Engineering, Ocean Engineering Report No. 12, University of Delaware, Newark, DE.
- Galvin, C. J. (1969): Breaker travel and choice of design wave height, Journal of Waterways and Harbors Division, American Society of Civil Engineers, Vol. 95, No. 2, pp. 175-200.
- Larson, M., N. C. Kraus and T. Sunamura (1988): Beach profile change: Morphology, transport rate, and numerical simulation, Proceedings of the 21st Coastal Engineering Conference, American Society of Civil Engineers, pp. 1295-1309.
- Larson, M. and N. C. Kraus (1989 a): SBEACH: Numerical model for simulating storm-induced beach change, Report 1: Theory and model foundation, Technical Report CERC-89-9, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS.
- Svendsen, I. A. (1987): Analysis of surf zone turbulence, Journal of Geophysical Research, Vol. 92, No. C5, pp. 5115-5124.