

浜崖の形成に関する数値解析について

西 隆一郎・佐藤 道郎・Hsiang Wang*

(受理 平成5年5月31日)

Field Observation and Numerical Simulation of Beach and Dune Scarping

Ryuichiro NISHI, Michio SATO and Hsiang WANG

A numerical approach has been used to study the generation of the beach scarp which lies as the distinct boundary between the beach and the hinterland. It is found, as a result of heavy waves, that the steeper the initial beach slope, the larger the resulting beach scarp. The rise in water level is added to the mean water level accelerates the generation of the beach scarp, as well. In addition, the longshore distribution of the incident wave height is a possible factor resulting in the generation of the non-uniform beach scarp in a longshore direction.

1. まえがき

砂質海岸に侵食性の暴浪が作用する場合に、写真1や2に示すような浜崖と呼ばれる侵食地形の海浜地形が生じる事がある。これまでに、海浜の侵食機構については数多くの知見が得られているが、侵食過程で時に生じる事がある浜崖の形成機構については余り分かっていないようである。浜崖がいったん形成されると汀線付近に反射的な構造物が存在するようなものであり、侵食に引き続く海浜の回復過程において負の効果を持つかも知れない。さらに侵食過程においても浜



写真—1 砂丘侵食におよぶ浜崖の例



写真—2 人工海浜での浜崖の例

*Professor, Coastal & Oceanographic Eng., Univ. of Florida, Gainesville, Florida 32611 U.S.A.

崖の基部を波が洗掘し上部斜面の滑落を引き起こしやすくなり砂丘の後退速度を速める可能性がある。浜崖の形成により汀線や砂丘が後退する事は、その背後に広がる民家やその他の資産の被害を引き起こすだけでなく、砂浜を利用する生物の生息場所や産卵場所を失う事でもある。このように海岸保全・利用上問題となる浜崖の形成やそれに引き続く砂丘の侵食機構についての知見を深める事は工学的にも重要な問題と考えられるので、本論文ではこれらの問題について主に数値計算を用いて考察していく事にする。

2. 既往の研究

海岸には浜崖に見かけ上似た地形として海蝕崖がある。この侵食機構については堀川らにより航空写真を用いて(1967¹⁾, 1969²⁾, 1970³⁾, 1972⁴⁾), また実験的(1968⁵⁾)に明らかにされている。このような海蝕崖の場合、一般に岩石で構成されているので波に対する抵抗力は砂質海岸よりもかなり大きいと考えられ取り扱うタイムスケールも長期間にわたるが、砂質海岸の場合には構成材料が主に砂であるために、波作用に対する地形変化のタイムスケールは短期的であり、加えて、侵食に引き続く堆積過程が起こるなどの違いがあると考えられる。さて、砂質海岸の侵食、特に砂丘の侵食に関しては高潮などの水位上昇を伴う場合を対象として現地観測や水理実験が行われてきている。Graff (1977)⁶⁾は、高潮により被害を受けた砂丘の現地測量データに基づいて侵食断面形を定義しており、また Vellinga (1982⁷⁾, 1983⁸⁾, 1986⁹⁾)は室内実験結果等に基づいて高潮を伴う暴浪により形成された海浜の平行断面形状を定義し、その断面をコンピュータを用いて計算できるようにしている。さらに Sargent 等 (1985)¹⁰⁾はこのモデルを米国東海岸とメキシコ湾岸の海浜断面に適用している。これらと平行して Hughes 等(1981)¹¹⁾は、砂丘侵食に関する室内実験を行った。時間に依存した砂丘侵食の数値モデルは Kriebel 等 (1984)¹²⁾, 1985¹³⁾), Larson 等 (1989)¹⁴⁾, 1990¹⁵⁾), Kriebel (1990)¹⁶⁾)により開発されているが Kriebel モデルは Dean (1977)¹⁷⁾の平衡海浜断面形状の概念に基づいているので沿岸砂州の再現が行えない、基本的に水位変動が地形変化の主要因である等の問題が残っている。このように、海蝕崖や砂丘の侵食についてはある程度の知見に基づいた数値予測が可能な状態になりつつあるといえるが、浜崖の形成機構についてはこれからの研究が必要と思われた。

3. 浜崖の数値計算

浜崖は基本的に侵食過程において形成される地形であるから、台風・季節風やハリケーンなどの暴浪が砂浜に襲撃するときには生じるはずである。しかしながら現象を明らかにするための暴浪作用時における海浜測量や波の現地観測は困難であるので、第一段階として数値実験により浜崖形成の様子を調べる事にした。数値モデルに関しては Vellinga モデルは時間的な海浜地形変化を追跡できず、沿岸砂州の再現もできない、また予測時間が限られている事等の欠点があり Kriebel モデルは時間的な砂丘海浜系の変化を計算できるが砂州の再現ができない事、さらに入射波浪に制限がある事などを考慮して、Larson 等により提案された SBEACH モデルをプログラミングして浜崖の再現計算に応用した。以下に彼らのモデルの概略を述べる。

3.1 SBEACH モデルの概要

このモデルは、大型造波水路試験のデータに基づいており、計算の手順は通常の一次元の海浜変形モデルと同様に(1)波の変形計算、(2)岸一沖漂砂量の計算、(3)底質の連続式に基づく地形変化計算の3つの計算部分より構成されている。波の変形計算については、Dally 等(1980)¹⁸⁾, 1985¹⁹⁾)と類似の式を用い、漂砂量については、波の変形に基づき海浜断面を4つの漂砂帯に分け基本的には碎波帯内におけるエネルギー消散に基づいて岸一沖漂砂量を求めている。また、底質の連続式は、2つの時間レベルにおける漂砂量に基づいたものを用いている。

(1) 波の変形計算

波変形の基礎式は

$$\frac{\partial}{\partial x} (F \cdot \cos \theta) + \frac{\partial}{\partial y} (F \cdot \sin \theta) = \frac{\kappa}{d} (F - F_s)$$

ここで、 F は波のエネルギーフラックス、 F_s は安定波のエネルギーフラックス (Stable wave energy flux)、 κ は波の減衰係数そして d は全水深である。 F_s は次式により求められる。

$$F_s = E_s \cdot C_s = \frac{1}{8} \rho g H_s^2 \sqrt{gh} = \frac{1}{8} \rho g (\Gamma h)^2 \sqrt{gh}$$

ここで、 Γ は安定状態における波高と局所水深の比である。加えて、平均水深は次式より求める。

$$\frac{dS_{xx}}{dx} = -\rho g d \frac{d\eta}{dx}$$

この平均水位の計算においては、Dally 等により繰り

返し計算でなく、直接解を求める方法が示されており、このプログラミングでもそれを用いた。また、プログラミングでは直角入射のみを対象とし(1)式で $\theta = 0$ としたものを用いた。

(2) 岸—沖漂砂量の計算

漂砂量の計算を行う前に波の変形に基づき、海浜断面を4つ漂砂帯域(I)前砕波帯(Prebreaking zone)、(II)砕波遷移帯(Breaker transition zone)、(III)砕波帯(Broken wave zone)、(IV)遡上帯(swash zone)に分ける。砕波遷移帯の長さについては経験的に砕波波高の3倍が、遡上限界についてはSurf similarity parameterの関数である次式が採用される。

$$\frac{Z_r}{H_0} = 1.47 \left[\frac{\tan\beta}{\sqrt{H_0/L_0}} \right]^{0.79}$$

ただし、 Z_r は遡上高さ、 $\tan\beta$ は砕波点の沖側の海底勾配 H_0/L_0 は深海波の波形勾配である。

岸—沖漂砂量については領域(I)で次のように求められる。

$$q = q_b e^{-\lambda(x-x_b)}$$

ここで、 q_b は砕波点での漂砂量、 λ は漂砂量の空間減衰係数、 x_b は砕波点位置である。

領域(II)の岸—沖漂砂量については、次式が用いられる。

$$q = q_p e^{-\lambda_2(x-x_p)}$$

ここで、添字 p は波の突込み点(Plunging point)での諸量を表し、漂砂量の空間減衰係数 λ_2 の値は λ のほぼ0.2-0.5倍の値が用いられる。

領域(III)の岸—沖漂砂量は次式より求められる。

$$q = \begin{cases} K[D - D_{eq} + \frac{\epsilon}{K} \frac{\partial h}{\partial x}] & \text{for } D > [D_{eq} - \frac{\epsilon}{K} \frac{\partial h}{\partial x}] \\ 0 & \text{for } D \leq [D_{eq} - \frac{\epsilon}{K} \frac{\partial h}{\partial x}] \end{cases}$$

ここで、 K は漂砂量係数、 ϵ は局所海底勾配に依存する漂砂量係数、 D と D_{eq} はMoore (1982)²⁰⁾に従いそれぞれ次式で定義される。

$$D = \frac{1}{h} \frac{\partial F}{\partial x}$$

$$D_{eq} = \frac{5}{24} \rho g^{3/2} \gamma^2 A^{3/2}$$

ここで γ は砕波指標(H_b/h_b)である。

領域(IV)の岸—沖漂砂量は、この領域での地形変化が一様であると仮定して次式により求めている。

$$q = q_z \left[\frac{x - x_z}{x_z - x_r} \right]$$

ここで、添字 r は遡上点を、 z は遡上開始を表わす。

上述の各漂砂量式においては、それぞれ正味の漂砂量の絶対値しか求まらないので、その向きについては大型水路試験結果に基づいたKraus等(1991)²¹⁾より求める。

$$\frac{H_0}{L_0} = M \left[\frac{H_0}{Wt} \right]^3$$

ここで、 $M = 0.00070$ 、 W は底質粒子の沈降速度、 T は波の周期であり、左辺より小さいときには海浜断面は侵食型のものになる。

(3) 底質の連続式の計算

底質の連続式は次式で示される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial x}$$

具体的に、地形変化の計算を行う場合には2つの時間レベルにおける漂砂量を用いる。

$$\frac{h_i^{t+1} - h_i^t}{\Delta t} = \frac{1}{2} \left[\frac{q_{i+1}^{t+1} - q_i^{t+1}}{\Delta x} + \frac{q_{i+1}^t - q_i^t}{\Delta x} \right]$$

ここで、添字 K は時間レベルを、 i は格子番号を表す。

4. 数値計算結果と考察

浜崖の形成要因としていくつか考えられるが、ここでは海浜勾配の影響、短期的な水位上昇の影響、入射波高の沿岸方向分布の影響について考察する。

(a) 一様勾配海浜における浜崖の形成

浜崖の形成に対する海浜勾配の効果を調べるために、1/20、1/15、1/10の勾配の一様海浜に波高2.3m、周期6.0秒の波を20時間作用させた場合の計算結果を図-1にそれぞれ示す。

1/20勾配の海浜モデルにおいては波を作用して1時間後には沖方向165m付近に沿岸砂州が形成され始めると同時に汀線付近が少し侵食されている事が分かる。沿岸砂州は徐々に時間が経つにつれ沖方向へ移動し比高が大きくなっている。波作用6時間後においては汀線付近に浜崖に近いものが形成されており、10時間後にかけて斜面の安息角に等しい勾配の浜崖面が形成され20時間後には高さ1.4m程の浜崖が形成されている。10時間、15時間の浜崖面を見ると同じ斜面勾配の断面が単に平行移動しているように見えるが、実際はその間において、6時間から10時間の断面変化にみられるように、計算中瞬間的に斜面の限界安定角を越えた浜崖が斜面崩壊を起こしある安定な斜面へ落ちつき、さらに波の作用が続くと浜崖の発達が続く次の斜面崩壊を引き起こす現象が生じている。このような斜面崩壊を通して海浜への底質の供給が行われている。

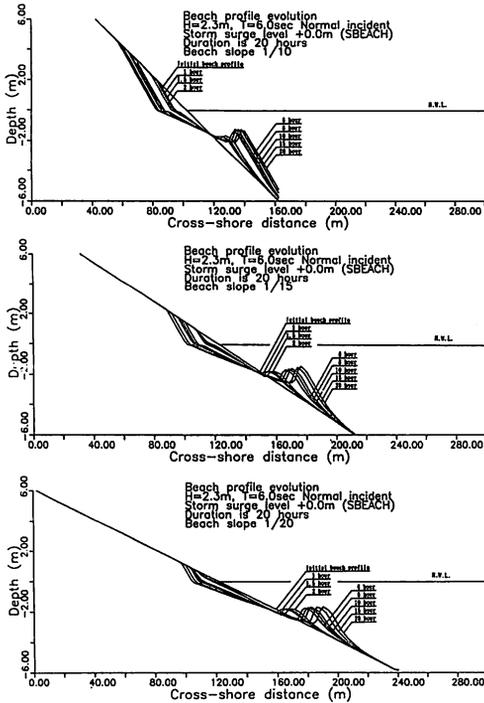


図-1 1/20, 1/15, 1/10勾配海浜での浜崖の形成例

さて、1/15の勾配を持つ海浜に同じ波が入射した場合も同様に、沿岸砂州の形成と平行して汀線付近が侵食され徐々に浜崖の形成が始まり、波作用20時間後においては2.3m程度の浜崖が形成されている。1/10勾配の海浜断面では、波作用1時間後において既に完全な浜崖が形成されており波作用20時間後においては高さ4.5mの浜崖に成長している。このように、海浜の勾配が険しいほど、浜崖の出現が速く浜崖の高さも大きくなる事が分かる。逆に言えば、海浜勾配が険しいほど、汀線より上部の前浜から浜崖形成により多量の底質を碎波帯に供給するとも言える。

次いで図-2に浜崖の成長の様子を見るために、横軸に時間、縦軸に浜崖の高さをそれぞれプロットしたものを示す。これより1/10勾配の海浜(実線)では時間とともに少しずつ浜崖の高さの増加が減少する傾向にある。これは、浜崖面が崩壊するとき浜崖の高さが高いほど多量の底質を浜崖基部から前浜にかけて供給するので、結果として侵食を遅らせる事と、入射波浪に対する平衡断面形状に碎波帯の地形が近づいているために結果として浜崖の侵食量が減少する事が考えられる。浜崖頂部の後退速度も図-3に示すように、

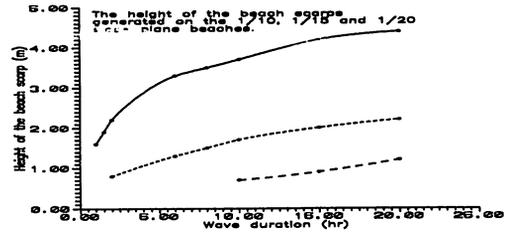


図-2 浜崖の高さの変化

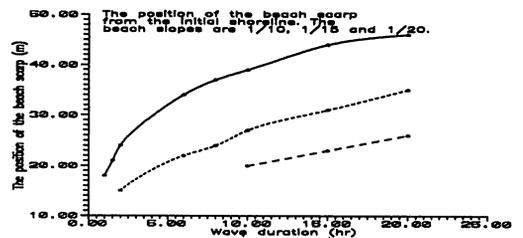


図-3 浜崖頂部の後退速度

波作用初期の方が速く徐々に遅くなっている。

(b) 砂丘—海浜断面における浜崖の形成

上節においては浜崖の形成に対する一様海浜の勾配の影響について考察したが、このような単純な一様勾配を持つ海浜は少なく自然の海浜断面はもう少し複雑なので、ここでは実際の砂丘—海浜断面を持つ海岸に波高2.3m, 周期6.0秒の波浪が20時間作用した場合について数値計算を行った。ただしここでは台風、季節風やハリケーンなどによる吸い上げや吹き寄せによる平均水位の上昇が無い場合と、平均水位の上昇が1.0m, 2.0mある場合を想定した。計算結果を図-4に示す。図-4において上から平均水位の上昇が無い場合では、入射波浪により沿岸砂州が形成されそれぞれ徐々に沖合いに移動している。汀線付近にも若干の侵食がみられるが、波作用20時間後においては浜崖の形成はほとんど見られない。ところが平均水位の上昇が1mの場合は、沿岸砂州の形成とともに浜崖が形成されバームの侵食も進んでいる事が分かる。さらに平均の水位の上昇が2mの場合は、バームが完全に侵食された後、砂丘の侵食が始まり波浪による侵食量も前者に比べて大きくなっている。これらの結果から、高潮などのような平均水位の上昇を伴う侵食性の波浪が砂浜に襲来すると、浜崖の形成が助長される事が分かる。

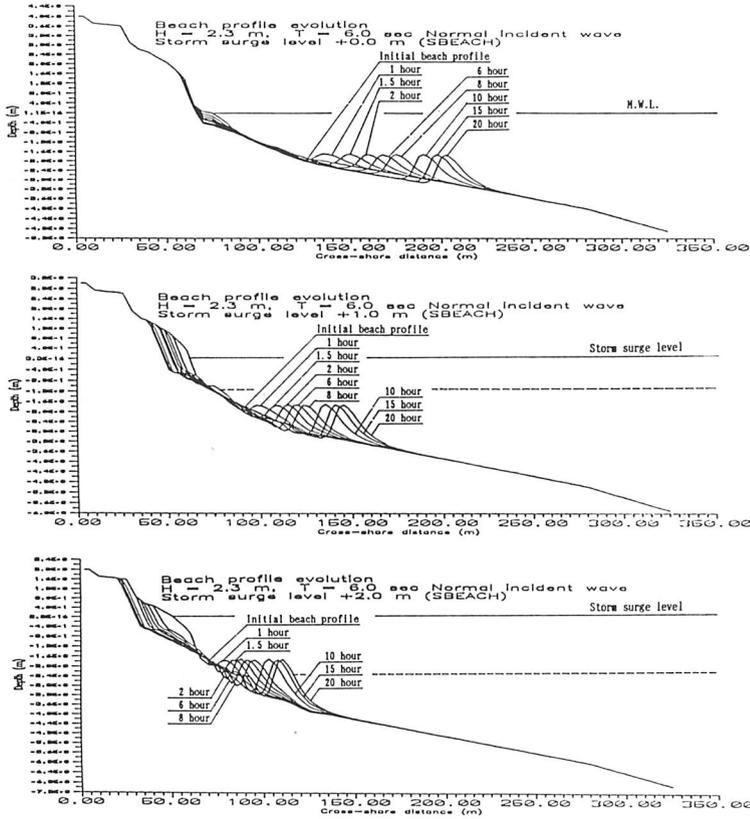


図-4 砂丘—海浜断面での浜崖の形成

(c)沿岸方向に波浪分布がある場合の浜崖形成について



写真-3 沿岸方向に高さが異なる浜崖の例

浜崖には写真2に示したように沿岸方向に高さや断面形状が一様な場合と、写真3に示すように沿岸方向に円弧状の浜崖海岸が出現し、その中央部では浜崖の高さが高く終端部においてほとんど浜崖の形成がない

海浜断面を示す場合もある。ここでは、このような浜崖に対して、沿岸方向に波浪分布が存在するためにこのような地形が現れたのではないかと考え数値実験を行った。まず、計算においては何らかの原因で図-5に示すような波高分布が沿岸方向に存在すると仮定する。ここで、図中の波高分布については計算の便宜性を考慮して

$$H(x) = H_1 + H_2 \sin^2\left(\frac{2\pi}{400}x\right)$$

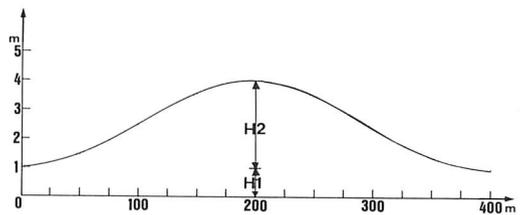


図-5 計算に用いた入射波高分布

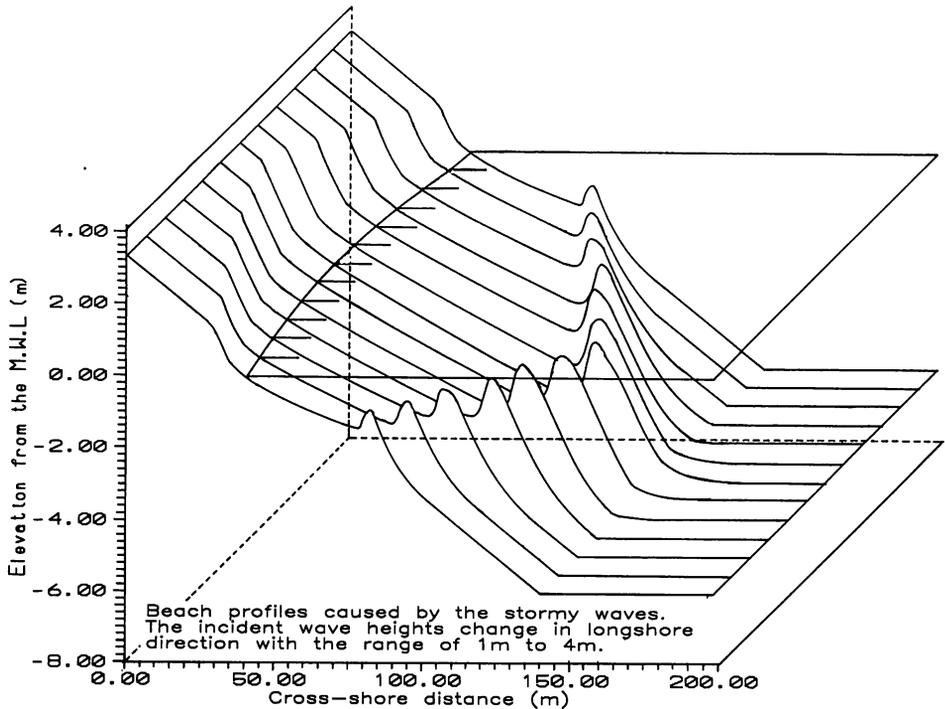


図-7 入射波浪が沿岸方向に異なる場合の浜崖の形成例

と仮定して、計算に用いる入射波高を決め、浜崖の沿岸方向分布を計算した。計算には1/10の一樣勾配の海浜を用いた。図-7に波作用20時間後の海浜地形と浜崖断面を示す。入射波高に応じて汀線位置が若干屈曲している事が分かる。浜崖も両端部から中央部に向かうに連れてその高さその後退量が大きくなっている。浜崖頂部の沿岸方向分布の方が汀線の沿岸方向分布に比べてその屈曲の度合いが大きい。このように図-5に示される様な波高分布を持つ波が入射した場合に、沿岸方向に一樣でない高さの分布を持つ浜崖が形成される可能性がある事が数値実験により示された。ただし、ここまでの数値計算は岸一沖漂砂だけを対象としており、今後は三次元のモデルに基づいて沿岸方向に波高分布を持つ場合の浜崖の形成について検討する事が必要である。

5. あとがき

暴浪による浜崖の形成に関し数値実験を用いて考察する事を試みた。その結果、まず一樣勾配の海浜では海浜勾配が険しいほど浜崖も形成されやすく、浜崖の高さが高くなる事が分かった。また図-3に示すよう

な砂丘—海浜断面に平均水位の上昇を伴う暴浪を作用させた場合、高潮高さが大きいほど浜崖が形成されやすく砂丘の侵食規模も大きい事が分かった。さらに、沿岸方向に弧状の分布を持つ浜崖に対しては沿岸方向の入射波浪分布が一つの可能な原因である事が分かった。ただし、これらの結論は全て数値計算に基づいており、今後水理実験や現地観測を通して浜崖の形成に関するデータを収集し数値計算の裏付けを行う必要がある。また、数値実験においては浜崖の侵食過程で起こり得るであろうノッチの形成、砂丘と海浜底質の底質粒子の相違、砂丘面のCompactionの効果、植生による被覆の効果を含めて、モデルに取り込んでいない要因も残っており、今後現地観測等に基づいた改良が必要である。

参考文献

- 1) 堀川清司・砂村継夫(1967)：航空写真による海蝕崖の後退に関する研究，第14回海岸工学講演会講演集，pp.315-324
- 2) 堀川清司・砂村継夫(1969)：千葉県屏風ヶ浦の海岸侵食について—航空写真による海蝕崖の後退に

- 関する研究第2報一, 第16回海岸工学講演会講演集, pp.137-145
- 3) 堀川清司・砂村継夫(1970):千葉県屏風ヶ浦の海岸侵食について(2)—航空写真による海蝕崖の後退に関する研究第3報一, 第17回海岸工学講演会論文集, pp.289-296
 - 4) 堀川清司・砂村継夫(1972):千葉県屏風ヶ浦の海岸侵食について(3)—航空写真による海蝕崖の後退に関する研究第4報一, 第19回海岸工学講演会論文集, pp.13-17
 - 5) 堀川清司・砂村継夫(1968):海蝕崖の侵食に関する実験的研究, 第15回海岸工学講演会講演集, pp.149-157
 - 6) van de Graff, J. (1977) :Dune erosion during a storm surge, Coastal Engineering, Vol. 1, pp. 99-134
 - 7) Vellinga, P., (1982) :Beach and dune erosion during a storm surge, Coastal Engineering, Vol. No. 4, pp. 361-389
 - 8) Vellinga, P., (1983) :Predictive computational model for beach and dune erosion during storm surge, Proceedings coastal Structures '83 , Washington DC, pp.806-819
 - 9) Vellinga, P., (1986) :Beach and dune erosion during a storm surges, delft hydraulics communication no.372
 - 10) Sargent, F. E. and Birkemeier, W. A., (1985) : Application of the dutch method for estimating storm-induced dune erosion,
 - 11) Hughes, S. A. and Chiu, T. Y., (1981) :Beach and dune erosion during severe storms, Dept. of Coastal and Oceanographic Engineering, University of Florida, Gainesville, Florida
 - 12) Kriebel, D. L. and Dean, R. G., (1984) :Beach and dune response to severe storms, ICCE 19 ,ASCE, pp.1584-1599
 - 13) Kriebel, D. L. and Dean, R. G., (1985) :Numerical simulation of time-dependent Beach and dune erosion, Coastal engineering, 9 ,pp. 221-245
 - 14) Larson, M. and Kraus, N. C. (1989) :SBEACH: Numerical model for simulationg storm induced beach change. Report 1 . Empirical foundation and model development. Technical Report CERC -89-9
 - 15) Larson, M. and Kraus, N. C. (1990) :SBEACH: Numerical model for simulationg storm induced beach change. Report 2 . Numerical foundation and model tests. techical Report CERC -89-9
 - 16) Kriebel, D. L. (1990) : Advances in numerical modeling of dune erosion, ICCE 22 , ASCE, pp. 2304-2317
 - 17) Dean R. G. (1977) : Equilibrium beach profiles : U. S. Atlantic and Gulf Coasts, Ocean Engineering Report No. 12 ,Dept Civil Engineering University of Delaware, Newark, Delaware
 - 18) Dally, W. R., (1980) : A numerical model foe beach profile evolution,M. S. thesis, University of Delaware, Newark, DE.
 - 19) Dally, W. R., Dean, R. G., and Darlymple, R. A., (1985) : A model for breaker decay on beaches, ICCE 19 , ASCE, pp. 82-98
 - 20) Moore, B. D. (1982) : Beach profile evolution in response to changes in water level and wave height, M. S. thesis, University of Delaware, Newark, DE.
 - 21) Kraus, N. C., Larson, M., and Kriebel, D. L., (1991) : Engineering of beach erosion and accretion predictors, Coastal Sediments '91 ,pp. 572-587