

砂丘侵食機構とモデル化について

西 隆一郎*・Nicholas C. Kraus**

1. 序 論

高潮や津波による沿岸域の被害を低減する上で、自然の堤防として働く砂丘の役割は重要である。また、我が国だけでなく、バングラデシュやオランダ等の低平地では、砂丘の存在が国土保全上非常に重要であるために、高波浪による砂丘侵食を予測する事が必要になる。

さて砂丘保全に関して、米国では砂丘前面に養浜工を施し、オランダにおいては砂丘自体の幅や高さを広げるための造成・増強をはかることが一般に行われているが、いずれにしても砂丘の設計が、砂丘背後地を暴浪による侵食被害から保護するための重要な海岸保全工法のひとつであることは明白である。

このような砂丘侵食を予測する実用的な数値モデルに関連する研究としては、表一1にあげるようなものがある。しかしながら、養浜や人工砂丘の設計に際しては出来るだけ安定で、しかも地形の時間変化を追跡できるモデルが望ましいために、表中の平衡海浜断面形状の概念に基づいた Kriebel モデルや SBEACH モデルが、米国では幅広く用いられている。ただし、平衡海浜断面形状の概念に基づいたモデルは、砕波帯内の現在のプロファイルと平衡海浜断面形状との差により岸沖漂砂量が求まるために、もともとの砕波帯初期地形が、平衡断面形状であった場合、いくら高波浪が作用しても砂丘を含めた地形変化が生じないことになり、現実には生じる砂丘侵食を説明できない不都合が生じる。

そこで、まず現地海浜で生じている砂丘侵食機構について定性的に考察し、その後、SUPERTANK プロジェクト (Kraus et al., 1992) 等の大型造波水路試験で得られた地形変化データに基づいて、砂丘侵食の定量的な検討を行なう事にした。そして、このような現地と大型造波水路で得られた知見に基づいて、平衡海浜断面形状に基づいた砂丘侵食モデルに、汀線上部の遡上波による砂丘侵食量の評価を行なう機構を加えた数値モデルの開発を行ない、砂丘侵食実験の再現計算を行なった。

表一1 砂丘侵食モデルと関連する研究

Models and studies	Authors
1. Steady state (Geometrical)	Van der Graff (1977) Hughes and Chiu (1981) Vellinga (1983) Sargent and Birkemeier (1985) Hallermeier and Rhodes (1988), etc.
2. Time dependent	Kriebel and Dean (1985), Kriebel (1990) Larson and Kraus (1989, 1990) Wang et al. (1992) Steezel (1993) Nishi et al. (1994), etc.
3. Swash wave	Overton and Fisher (1988, 1994), etc.
4. Theoretical	Kobayashi (1987)
5. Field survey	Edelman (1968, 1972) Kana (1977), etc.
6. Dune protection	Auerbach et al. (1988) Dette and Raudkivi (1994), etc.

2. 現地の砂丘侵食機構

目視では、砂丘侵食時に以下に示す 3 つの基本的砂丘侵食形態が、生じていると考えられた。

- (1) Layer separation (砂層の分離)
- (2) Notching and slumping (ノッチングとスランピング)
- (3) Sliding and flowing (スライディングとフロー)

(1) と (2) については短期間の砂丘侵食で卓越する機構なので写真一1 と 2 にその様子を示す。加えて、それぞれの侵食の模式図を図一1 に、また、その説明を以下に示す。

(1) Layer separation; 波の衝撃により砂層内部にせん断面が生じ、砂浜表面には砂層の分離を示すクラックが見えている。この海側の分離砂層の厚さは、締り度や入射波浪の条件に依存すると考えられるが、現地では 30-50 cm 程度、大型造波水路実験では 10-30 cm 程度の砂層厚が観測された。このせん断面は、ある程度の遡上波が継続して作用した後に、突然砂丘本体から分離して崩壊する。

(2) Notching and slumping; 砂丘面がほぼ垂直に

* 正会員 工修 鹿児島大学助手 工学部海洋土木工学科
** Ph.D Prof. Texas A & M University-Corpus Christi

なっており、遡上波の先端がこの垂直の基部に作用するようになると、基部の部分にノッチングが生じて、上部の土塊が崩落するようになる。この機構は、砂丘面がほぼ垂直で植物の根などにより砂丘自体が保持され、あるいは非常に締っているか固形状の物質により砂丘が構成されている時に生じ易いようであった。(1)の砂層の分離が生じる時にノッチングが生じることもあるが、(1)の侵食機構内での卓越機構ではない。Notching and slumping により土砂が砂丘前面に堆積するが、Layer separation に比較すると、土砂が堆積する範囲が狭い。



写真-1 砂層の分離



写真-2 ノッチングとスランピング

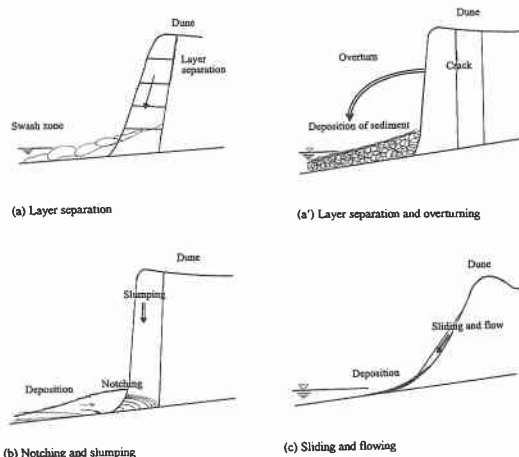


図-1 砂丘侵食機構概念図

(3) Sliding and flowing; この侵食は砂丘の斜面勾配が安息角に近く表層の砂が乾いている時に生じ易い。この機構は、砂丘の基部を中くらいの波が作用したり、あるいは降雨によって生じることもある。この侵食機構は顕著な砂丘侵食を短期間に生じさせることはないが、砂丘フロントを險しくさせて行くために、Layer separation や Notching and slumping を引き起こす誘因となる。

Layer separation では、図-1(a), (b) に示す様に分離砂層がブロック状の塊になって砂丘前面に崩落して遡上域に堆積する場合と、分離砂層が倒壊する場合がある。また、(1), (2), (3)の機構とも時間平均して考えれば、砂丘から侵食された砂が遡上域に堆積し、引き続き遡上波により碎波帯内に運ばれると考えてよいように思われる。

3. 大型造波水路実験

SUPERTANK プロジェクトで実施された不規則波による平衡海浜斜面の侵食実験と2ケースの砂丘侵食実験のデータ解析を行ない、海浜と砂丘の侵食機構について検討した。それぞれ平衡海浜と砂丘の侵食実験の入射波は $H_{m0}=0.5-1.5$ m (通常は 0.8 m), $T_p=3.0-6.0$ sec (通常は 3.0-4.5 sec) と $H_{m0}=0.5-0.8$ m, $T_p=3.3-6.0$ sec であった。実験条件の詳細は、Kraus and Smith (1992) を参照する。

(a) 平衡海浜斜面侵食実験

図-2 に不規則波による海浜地形変化を示す。沖側に砂州が出来るのに対応して、汀線近傍では徐々に斜面勾配が険しくなっていることが分かる。また、図中矢印で示す4つの侵食 event をみると、汀線が急激に後退する時にはほぼ一様な斜面角を持っていることが分かる。汀線近傍の侵食部機構について詳細に見るために、2番目の侵食 event と、3番目の侵食 event の拡大図を図-3 に示してある。図-3 で、前浜上部の勾配が遡上波による沖向き漂砂で徐々に険しくなり、前浜の高さも低下し、そして、ある波数が作用した段階で険しくなった斜面の崩壊が生じていることが分かる。この様な遡上域の前浜の高さの低下と、斜面の急勾配化により、断続的な斜面崩壊が生じ、これに対応して汀線の後退も断続的に続いて行く。斜面崩壊については、SBEACH モデルでは 28° 程度で斜面崩壊が起こり 18° 程度の角度に落ち着くとしている。また、Kriebel モデルでは斜面勾配を $1:1$ の勾配 (45°) に設定してあるが、この実験の汀線付近の斜面角は $1:1$ の勾配よりやや緩い 42° 程度の値を取っている。このように遡上域先端に波を反射するような浜崖斜面が形成されると、遡上波が浜崖前面に直接衝突するようになり、侵食量の増加をまねくことになる。

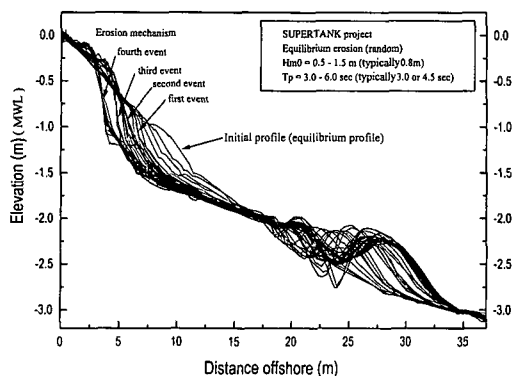


図-2 平衡海浜の地形変化

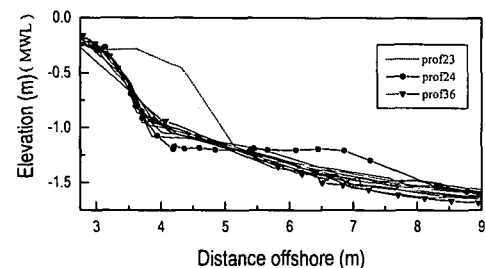
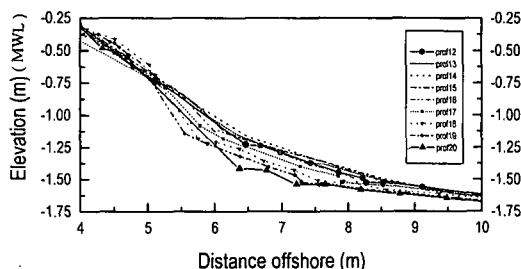


図-3 平衡海浜の侵食過程

(b) 砂丘侵食実験

図-4 に、普通に設置した砂丘とパイプレーターを用いて2時間ほど締め固めて設置した砂丘の不規則波による地形変化を示す。砂丘は平衡海浜断面背後に設置してある。それぞれ急勾配を持つ砂丘フロントが、遡上波の作用により形成され、そして、浜崖状の地形をみせながら砂丘面が後退している。また、砂丘前面に侵食された底質が堆積し、徐々に汀線近傍の勾配が緩やかになっていることが分かる。更に、砂丘面が後退するときには、それぞれ 60° , 88° 程度の斜面角を持ちながら後退している。また、侵食量については、締め固めた砂丘の方が少ないことも分かる。このようなことから、砂丘が侵食される時には、砂丘フロントがなんらかの機構で崩壊し、その底質が遡上域内に供給され、引き続き遡上波の作用により遡上域から碎波帯内に輸送されると考えてよいと

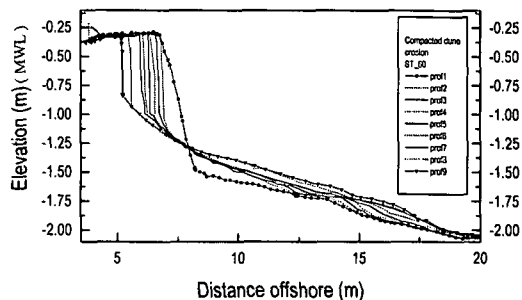
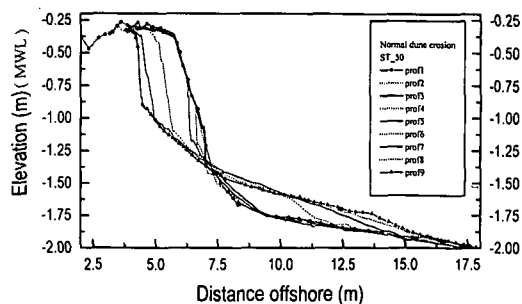


図-4 普通の砂丘と締め固めた砂丘の侵食

思われる。

4. 数値モデル

前記した現地での知見や大型造波水路データの解析結果に基づいて、二次元の数値海浜変形モデルを開発した。モデルでは、碎波帯内の地形変化は Dean (1977) により提唱された平衡海浜断面形状の漂砂機構に、そして、汀線より陸側に位置する砂丘部では、遡上波のインパクトによる砂丘崩壊に起因した漂砂発生機構を取り込んだ。また、この独立した2つの漂砂系間の底質輸送は遡上域内を通して成されるものと考えた。高潮を伴うような高波浪による侵食時には砂丘からの底質の Supply が、引き続き遡上波の作用により碎波帯内に分散される。そして、この砂の供給と、碎波帯内の砂の Demand が、何らかの形でつりあうように地形変化が進行するというモデルである。

(a) 波浪モデル

波浪の変形は Dally 型のモデル (1985) を用いた。

$$\frac{\partial}{\partial x}(F \cos \theta) = \frac{\kappa}{h}(F - F_s) \quad \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 F は波のエネルギーフラックス、 θ は波の入射角、 h は水深、 κ は経験的定数、 F_s は安定波のエネルギーフラックスである。

(b) 砂丘部からの底質供給 (Supply モデル)

現地観測や大型造波水路では、遡上波が砂丘面に衝突するようになると、波のインパクトにより侵食が生じることが分かったので、波のインパクトと砂丘侵食量を

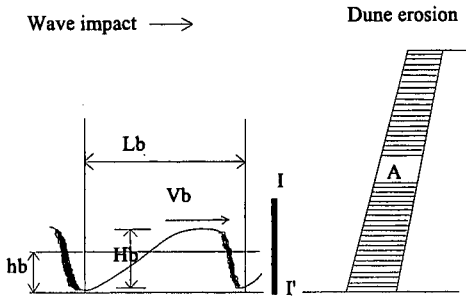


図-5 砂丘侵食機構図

図-5 に示す様に関連付けた。

そこでまず、波のインパクトを表すパラメータを導入する。ここで、砂丘に作用する遡上波は、上図に示す様にボア状の波で波高 H_b 、波長 L_b で水深が h_b であると仮定すると、図中 II' 断面を通して砂丘面に作用する波一波のインパクトは、以下のパラメータで表わされるはずである。

$$\begin{aligned} m' v_b^2 &\approx \frac{\rho_w}{2} H_b T \sqrt{g h_b} g h_b \\ &= \frac{\rho_w}{2} H_b g h_b T \sqrt{g h_b} \left(= \frac{\rho_w}{2} H_b T (g h_b)^{3/2} \right) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 ρ_w は水の密度、 T は波の周期、 g は重力加速度、 v_b はボアの速度である。もし、波の継続時間が Δt_r で、その間に N 波のボア状の波が砂丘に作用すると、波の全インパクトは、次式で評価される。

$$\begin{aligned} m' v_b^2 N &\approx \frac{\rho_w}{2} H_b g h_b T \sqrt{g h_b} N \\ &= \frac{\rho_w}{2} H_b g h_b T \sqrt{g h_b} \left(\frac{\Delta t_r}{T} \right) \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

この波のインパクトパラメータが、砂丘の侵食体積 V_{ero} 、あるいは、侵食重量 W_{ero} と次式のように結びつけられると考えた。

$$\begin{aligned} W_{ero} &= \rho_s g V_{ero} \\ &= \rho_s g A \times 1.0 \\ &= f \left(\rho_w H_b g h_b T \sqrt{g h_b} \frac{\Delta t_r}{T} \right) \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ここで、 ρ_s は底質の密度である。ただし、大型造波水路で得られた断面形状の解析では、(5) 式、(6) 式で示されるように、それぞれ普通に設置した砂丘と締め固めた砂丘に対して、波一波の単位波長当りのインパクトを表す量 $\rho_w H_b g h_b$ と波数のパラメータ $(\Delta t_r/T)$ が、侵食量と良い相関を持っていた。

$$W_{ero, normal} = 1.35 (\rho_w H_b g h_b \Delta t_r / T) \dots\dots\dots (5)$$

$$W_{ero, compacted} = 0.627 (\rho_w H_b g h_b \Delta t_r / T) \dots\dots\dots (6)$$

さて、(5)、(6) 式で示すような侵食量関数を用いれば、

ある単位波作用時間内の侵食体積量あるいは重量が計算できるので、次いで、砂丘から供給された底質が、砂丘前面の遡上域内に均一に輸送されるという仮定を用いて、地形変化量を計算した。

(c) 碎波帯内の地形変化 (Demand サブモデル)

碎波帯内の地形変化は、碎波帯内の波のエネルギーフラックスの消散 (Dean, 1977) に基づいた岸沖漂砂量に基づいて計算されるものとし、基本的には SBEACH モデルと同じ式を用いた。岸一沖漂砂量の計算式を以下に示す。

$$q = \begin{cases} K \left[D - D_{eq} + \frac{\epsilon}{K} \frac{\partial h}{\partial x} \right] & \text{for } D > \left[D - \frac{\epsilon}{K} \frac{\partial h}{\partial x} \right] \\ 0 & \text{for } D \leq \left[D_{eq} - \frac{\epsilon}{K} \frac{\partial h}{\partial x} \right] \end{cases} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 K = 漂砂量係数、そして ϵ = 勾配に依存した漂砂量係数である。また、 D は $(1/h)(\partial F/\partial x)$ 、 D_{eq} は $5\rho g^{3/2} \gamma^2 A^{3/2}$ である。ただし、 $\gamma = H_b/h$ で、 A は底質粒径に依存した形状係数 (Dean 1977) である。

5. 数値実験

図-6 に、締め固めた砂丘を対象にした数値実験結果を示す。実線で実験結果を、破線で計算結果を示す。碎波帯内の demand だけに基づいたモデルでは、砂丘の侵食はほとんど生じないが、砂丘からの底質供給機構を新たに加えた今回のモデルでは、妥当な砂丘侵食が計算できていることが分かる。

6. 結 論

SUPERTANK で行なわれた砂丘侵食実験では、普通に砂で作成した砂丘と、パイプレータを用いて締め固めた砂丘の2種類の模型を用いている。地形データ解析より、締め固めていない砂丘では後退時の斜面角が、締め固めた物に比べて緩く、また同じ波作用時間内では、そ

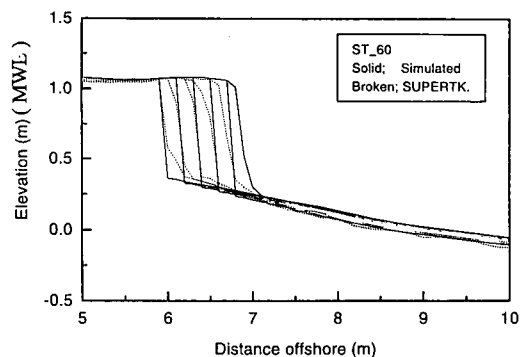


図-6 Supply-Demand モデルによる計算結果

の侵食量も多くなっていることが分かった。次に、地形変化から求めた経時的な砂丘侵食量と、入射する波の累積インパクト量を比較し実験的な関係式を求めた。その後、実験で得られた砂丘侵食量の実験式を用いて、砂丘侵食の再現計算を行なった。締め固めた砂丘を対象に、沖側境界での入射波を規則波として計算を行なった場合の結果は、実験結果を巨視的に再現しており、この計算アルゴリズムが、平衡海浜断面形状で起こる砂丘侵食の予測に用いられることを示している。

参 考 文 献

- Auerbach M. H., G. W. Borden, and B. L. Edge (1988): Dune stabilization with a sand/gel composite system, 21st ICCE, ASCE, pp. 1588-1612.
- Dally, W. R., Dean, R. G., and Dalrymple (1985): Wave height breaking variation across beaches of arbitrary profile, J. of Geophys. Res., 90(C6), pp. 11917-11927.
- Dean, R. G (1977): equilibrium beach profiles: U. S. Atlantic and Gulf Coasts, Dept. of Civil Eng., U. of Delaware, Newark, DE.
- Dette H. H. and A. J. Raudkivi (1994): Beach nourishment and dune protection, 24th ICCE, ASCE, pp. 590-591.
- Hallermeier R. J. and P. E. Rhodes (1988): Generic Treatment of dune erosion for 100-year event, 21st ICCE, pp. 1197-1211.
- Hughes S. A. and T. Y. Chiu (1981): Beach and dune erosion during severe storms, UFL/COEL-TR/043.
- Kana T. W. (1977): Beach erosion during minor storm, J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, ASCE, 103 (WW4), pp. 505-518.
- Kobayashi N. (1987): Analytical solution for dune erosion by storms, J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 113 (WW4), pp. 401-409.
- Kraus, N. C., Smith, J. M., and Sollitt, C. K. (1992): SUPERTANK laboratory data collection project, 23rd ICCE, ASCE, pp. 2191-2204.
- Kriebel D. L. (1990): Advances in numerical modeling of dune response to severe storms, 22nd ICCE, ASCE, pp. 15844-1599.
- Kriebel D. L. and R. G. Dean (1985): Numerical simulation of time dependent beach and dune erosion, Coastal Engineering, pp. 221-245.
- Kraus, N. C. and J. McKee (1994): SUPERTANK laboratory data collection project, Volume I: Main Text, Technical Report CERC-94-3, WES, US Army Corps of Engineers.
- Larson, M., and 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 Engineer WES, Vicksburg, MS.
- Nishi, R., Sato, M. and Wang, H. (1994): Field observation and numerical simulation of dune and beach scarping, 24th ICCE, ASCE, pp. 2434-2448.
- Overton M. F. and J. S. Fisher (1988): Simulation modeling of dune erosion, 21st ICCE, ASCE, pp. 1856-1867.
- Overton M. F., J. S. Fisher and K. Hwang (1994): Development of a dune erosion model using SUPERTANK data, 24th ICCE, ASCE, pp. 2488-2502.
- Sargent F. E. and W. A. Birkemeier (1985): Application of the Dutch method for estimating storm-induced dune erosion, Instruction Report CERC-85-2.
- Steetzel H. J., (1993): Cross-shore transport during storm surges.
- Van der Graff (1977): Dune erosion during a storm surge, Coastal Engineering, pp. 99-134.
- Vellinga, P. (1983): Predictive computational model for beach and dune erosion during storm surges, Waterloopkundig Laboratorium, Delft Hydraulics Laboratory, pp. 1-14.
- Wang, H and G. Miao (1992): A time-dependent nearshore morphological response model, 23rd ICCE, ASCE, pp. 432-446.