

砂丘—海浜系の侵食に関する現地観測と数値実験について

西 隆 一 郎*・佐 藤 道 郎**

1. まえがき

近年大型の台風、例えば1991年の台風9119号、1993年の9313号台風などが続いて来襲しており、海岸欠壊部が十分回復しない内に侵食される砂丘や海浜が、鹿児島県内で見られた。大型の台風による顕著な海岸の欠壊に関し、地形データを収集しその地形的な特徴や侵食の原因を調べることは、海岸保全や管理を行う上で重要と思われた。また、永井（1994）によれば年間の平均波高が近年増加傾向にある事が示され、加えて河川からの供給土砂量が減少している事を考えれば、海浜侵食部の回復速度は以前に比べると遅くなると考えられ、欠壊部の回復過程についても定期的な測量等を通じて明らかにする必要があると思われた。

鹿児島県には、東シナ海に面した海岸に吹上砂丘や、太平洋に面する志布志湾の海岸に砂丘があり、これらが台風により侵食され、浜崖が形成されるようになった。普通、前浜が十分な広さを持っていれば、波による砂丘の侵食は生じにくいと考えられる。また極端に大きい暴浪による海浜侵食や沿岸漂砂の不均衡がなければ、暴浪の後の穏やかな平常波で海浜は回復され、経年的に安定していると考えられる。ところが前浜上部や砂丘が侵食された場合、長周期波による前浜の回復等を除けば、通常の穏やかな波ではその欠壊部まで波がなかなか遡上せず、その結果、海浜の回復が完全に終わらない内に次の侵食性の波の作用を受けて、汀線と砂丘が更に後退してしまう事も考えられる。

砂丘は海洋と人間活動を営む陸地との境界として様々な役割をもっている。それはたんに波浪の作用から内陸部を守っているだけでなく、砂丘の海岸林による飛塙・飛砂の抑制作用、大型の台風等による海浜侵食時の底質供給源としての機能、海浜動植物の棲息領域としての機能、今後考えられる地球温暖化による海面上昇に対する緩衝領域としての機能、あるいはキャンプ場などを含めた親水性空間としての機能等を持っており適切な保全や管理が望まれている。

海浜の侵食についてはこれまでに数多くの研究が行われてきており、侵食の定量的評価は一次元のモデルから準三次元のモデルを用いたものまで可能になっているが暴浪による砂丘の物理的侵食機構については現象が気象・海象的に悪い条件下で発生するために詳しい観測が行えず、余り明らかになっているとは言い難い。また暴浪作用後の地形測量においては、既に海浜地形の回復を含んだデータになっている等の問題もある。そこで本研究では、鹿児島県沿岸で生じた砂丘—海浜侵食について現地測量を行い、その地形的特徴と発生原因について調べようとした。また、欠壊の数値解析においては砂丘と海浜を別々に取り扱わざ一つの連続した系として取り扱うようにした。

2. 現 地 観 測

海岸砂丘の侵食は、薩摩半島の東シナ海に面した側に長さ30数kmに渡り広がる吹上浜の砂丘と、大隅半島の志布志湾に面した柏原海岸で確認できたので、この二つの海岸において現地測量を行った。吹上浜では場所により高さが10m程の浜崖が砂丘侵食の結果生じており、その一例を写真-1に示す。

この写真からも分かるように、砂丘の海側斜面は砂の安息角にほぼ等しいスロープを持っているが、その下の侵食部は直角に近い斜面角を保っており、崖基部が侵食洗掘されて、その上部の土砂が崩落するという過程を繰り返し、砂丘の後退が進んでいる事が予想できる。海岸



写真-1 吹上浜における砂丘侵食例

* 正会員 工修 鹿児島大学助手 海洋土木工学科

** 正会員 工博 鹿児島大学教授 海洋土木工学科

欠壊部の測量は、志布志海岸でも行っており、本論文においては主に志布志海岸で得られたデータについて以降述べていく事にする。

この海域での砂丘—海浜侵食の経時的な様子をまず写真—2から4に示す。この海岸では1991年の19号台風等により写真—2に示すような浜崖が形成され、新聞等によれば最も欠壊が進んだ時で高さ7mを超える浜崖が形成され砂丘の侵食がかなり進んだようであった。この海岸では、侵食部に1993年度初期に写真—3に示す養浜が行われ、その結果幅の広い海浜が形成され、波作用から後背地の海岸林を護る事が期待された。その後、台風9307, 9313号等により再び海浜の侵食が生じ、写真—4に示すように高さ3mを超える浜崖が形成されるに至



写真-2 砂丘侵食により生じた浜崖の例



写真-3 養浜により広がった前浜



写真-4 海浜侵食により生じた浜崖

った。砂丘と海浜の侵食機構を調べるためにには、定期的な測量と暴浪時の観測が行えれば良かったのであるが、それが行えなかったので実際は、浜崖が形成されてからの観測を行う事になった。浜崖が最初どのようにして形成され始めたのかについては調査する事は出来なかつたが、浜崖に波が作用し浜崖前面が崩落し浜崖が後退していく様子については現地で観測する事が出来たので、写真—5にその様子を示す。この写真は外洋で発生したうねり性の波が作用しているときに撮ったものであるが、浜崖はほぼ垂直に切り立っており、部分的にはその基部に崩落した砂が堆積しているところもある。浜崖の基部に波が直接作用しているところでは、浜崖の頂部の後ろの海浜斜面上にクラックが入り、基部の洗掘が進むにつれて、このクラックより前の海側の砂が全体的に方塊状に崩れしていく。写真にはクラックが入り浜崖の前面の砂が崩壊していく瞬間を示しており、ブロック状の砂の塊が見える。このようにして浜崖基部に堆積した崩壊土砂は、引き続く波の作用により海浜に供給され沿岸砂州の形成を助長するものと考えられよう。写真—2, 4に示すように一旦何らかの原因で浜崖が形成されると高々2-3m程度の波であっても波が潮汐等の影響で直接浜崖に衝突し、斜面の崩壊を引き起こすので、遡上高に比べて非常に高い浜崖を生じさせる。浜崖の大きさは、入射波だけでなく、暴浪の作用する前の砂丘—海浜地形に依存していると考えられるが、これについては数値実験に基づき考察する事にする。

簡単に現地海浜における砂丘—海浜侵食について述べてきたが、この海域の侵食は汀線方向に一様な2次元的なものではなく、沿岸方向に弧状の分布を示していた。普通、砂丘の侵食にまで及ぶような侵食は、2次元的な例が報告されており(例えば、Graaff, 1977; Vellinga, 1986; Hughes, 1981), 今回の侵食欠壊は地形的にそれらと異なり興味深いものと言える。そこで、図-1に沿岸方向2kmにわたる海浜幅を、図-2に浜崖の高さの沿岸方向分布をそれぞれ示す。図-1では、海浜幅は南北にのびる植



写真-5 浜崖の形成の様子

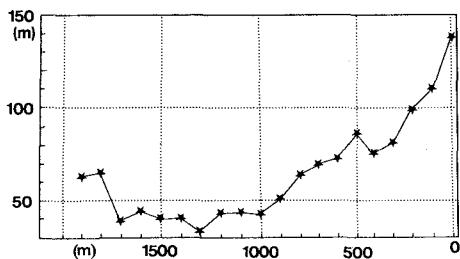


図-1 海浜幅の沿岸方向分布

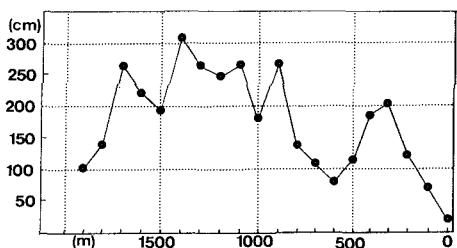


図-2 浜崖の高さの沿岸方向分布

生ラインから、浜崖の頂部までの距離として測ってある。図中の0点付近には浜と直角方向に沿岸漂砂を阻止するためのT字型突堤が設置してある。海浜幅は突堤付近で広く段々北に行くにつれて狭まり、1300m付近では海浜幅が35m程と海岸林に最も近づいており、海岸林などに飛塩による被害が及んでいた。浜崖の高さは、南北両端付近で低く南側の導流堤付近で浜崖はほとんど形成されていなかったが、海浜の幅が最も狭まっている中央部付近では浜崖の高さが3m程に達している。この位置は9119号台風の後に砂丘侵食にまで及ぶ7m程の浜崖が形成されていた位置とほぼ一致している。

3. 数 値 実 験

上述したような砂丘一海浜侵食について調べるために一次元の数値海浜変形モデルを用いて、侵食の原因や浜崖の形成、形状について考察した。砂丘の侵食に関してはこれまでに Vellinga (1983, 1986) や Kriebel (1984, 1990), そして Larson・Kraus (1989) により侵食量を予測するためのモデルが提案されている。ここではまず規則波を対象とし、Larson・Kraus (1989) により提案された SBEACH モデルを用いて数値計算を行った。次いで現地において作用している波は不規則波である事から、不規則波を対象とした一次元の数値海浜変形の計算も試みた。以下に、SBEACH モデルについて概略し、次いで、不規則波による砂丘一海浜侵食の計算法について略述する。

3.1 SBEACH モデルの概要

計算の流れは通常の一次元のモデルと同様に、波浪変形、岸一沖漂砂量、底質の連続式の計算部より成っており、目的とする波浪条件に対し時間依存した海浜地形の計算を逐次行っていくものである。このモデルは Moore (1982) や Kriebel (1984) モデルの発展形と考えられ、沿岸砂州の発生や砂丘の侵食などの計算にも適用できる。まず波浪変形モデルについては基礎方程式として Dally (1980), Dally et al. (1984, 1985) により提案されたモデルを用いている。

$$\frac{\partial}{\partial x}(F \cdot \cos \theta) + \frac{\partial}{\partial y}(F \cdot \sin \theta) = \frac{k}{d}(F - F_s) \dots (1)$$

ただし、 F は波のエネルギーーフラックス EC_g , E は波のエネルギー、 C_g は波の群速度、そして θ は波の入射角であり F_s は安定波のエネルギーーフラックスである。また平均水位 η は次式より求める。

$$\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} = -\rho g d \frac{\partial \eta}{\partial x} \dots (2)$$

漂砂量については碎波帯内における岸一沖漂砂量がその地点での単位体積当たりのエネルギーーフラックスの逸散率に比例するという仮定を採用し Dean 型の漂砂量式 (1977) を用いている。碎波帯の漂砂量式はよって(3)式に示すものを用いた。

$$q = K(D - D_{eq}) \dots (3)$$

ただし、 q は岸一沖漂砂量、 K は漂砂量係数、 D_{eq} は平衡断面形状に対するエネルギー逸散率である。遡上域においては、碎波帯端部の漂砂量が遡上地点まで直線的に減少するという仮定、つまり遡上域内ではどの地点でも一樣に地形変化が起きるという仮定を用いている。次いで底質の連続式については(4)式を用いた。

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial a}{\partial x} \dots (4)$$

3.2 不規則波による海浜変形の一次元モデル

ここでは工学的に使いやすく安定したモデルを開発する事を考えた。モデルの構成は基本的に規則波によるモデルと同じで、波浪変形、漂砂量の計算、底質の連続式的計算部より構成されている。波浪変形モデルとしては Goda (1978, 1983) の不規則波変形モデルを用いた。波浪変形モデルとして個々波の変形モデルを用い、それに対する漂砂量を求める事も可能ではあるが、ここで用いる漂砂量モデルは、入射波浪の周期より長い時間での平均的な正味の漂砂量である事から、一般的に馴染みの深い Goda モデルを用いて統計的な代表波高の岸一沖分布を求めて、それから平均漂砂量を求める手法を用いた。ここで用いた漂砂量式は、漂砂量が波のエネルギーーフラックスの逸散率の関数であるから規則波・不規則波ともに適用できるものと考えた。入射波については冲合いで

(5)式に示すレーリー分布を仮定し、波が一度碎波し始めると(6)式に示す分布で砕けていない波の分布を計算し、(7)式で碎波した波の再分布を含む新たな波浪分布を計算している。

$$P_0(x) = 2a^2x \cdot \exp[-a^2x^2] \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

$$P_r(x) = P_0(x); x \leq x_2$$

$$= P_0(x) - \frac{x-x_2}{x_1-x_2} P_0(x); x_2 < x \leq x_1 \\ = 0; x > x_1 \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

$$P(x) = \alpha \cdot P_r(x); 1/\alpha = \int_0^x P_r(x) dx \quad \dots \dots \dots \quad (7)$$

ただし、 $a=1.416$ 、 $x=H/H_{\text{sig}}$ 、 x_1 と x_2 は碎波限界の上限値と下限値である。碎波限界式については佐藤・小部と同様に式 (8) を用いた。

$$x_b = \frac{H_b}{H_0} \\ = \frac{A}{H_0/L_0} \left(1 - \exp \left[-1.5 \frac{\pi h}{H_0} \frac{H_0}{L_0} (1 + \kappa |\tan \theta|^{4/3}) \right] \right) \\ \dots \dots \dots \quad (9)$$

ただし、 $k=15$ 、 $L_0=gT^2/2\pi$ 、そして A は x_1 に対して0.12、 x_2 に対して0.18としてある。漂砂量については(3)式を用いた。

4. 実験結果と考察

まずは、浜崖の海浜勾配に対する影響を調べるために
1/10, 1/15, 1/20 勾配の一様斜面に規則波を作成させ浜崖の形成について調べ、結果を図-3に示す。

図-3(a), (b), (c)ともに汀線付近が徐々に侵食され底質が碎波点近傍に運ばれ沿岸砂州を形成している事が分かる。波の作用時間が増すに連れて汀線が後退し、浜崖が形成され始めているが斜面勾配が険しいほど浜崖の高さが大きくなる事が分かる。次いで、実際の砂丘一海浜断面を対象に台風に伴う水位上昇が加わった場合を想定して、侵食の経時変化を調べた。水位上昇量はそれぞれ0 m, 1 m, 2 mを対象として計算を行ったが、図-4(a), (b)にそれぞれ水位上昇が無かった場合と1 mの水位上昇があった場合についての計算結果を示す。波作用時間の増加とともに侵食された底質が沖に溜まり、沿岸砂州が成長している。また砂州の成長と対をなして静水時汀線より上側の底質が主に侵食され、そして砂丘の侵食が始まり、砂丘の後退と平行して浜崖の高さが大きくなる。水位上昇量が大きくなれば砂丘の侵食量が大きくなっている。これは、通常の砂丘一海浜断面では結果として水位上昇量が大きいほど、斜面勾配が険しい事になり侵食がより進み易くなり、浜崖の形成が助長されると考えられる。また、水位上昇量が大きいときには、砂丘から供給される底質が沿岸砂州の形成を助長し、そ

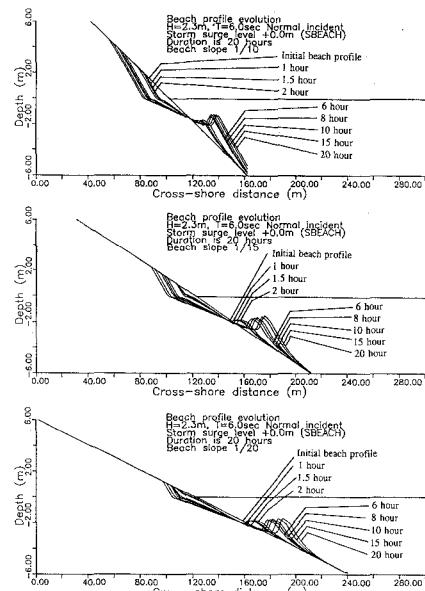


図-3 一様勾配斜面上での海浜侵食と浜崖の形成

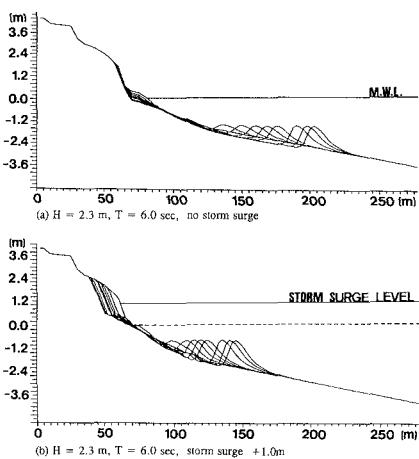


図-4 砂丘—海浜断面の水位上昇を伴う波による侵食

の結果海浜に作用する波エネルギーを減衰させるわけであるから、十分な高さの幅広い砂丘を保全する事は海岸管理上重要と考えられる。

さて、現地観測で得られたデータを見ると沿岸方向に海浜幅と浜崖の高さが弧状の分布を持っていたわけであるが、これについては沿岸方向に入射波浪が波高分布を持っていたためではないかと考えて、数値解析を行い、その結果を図-5に示す。図より入射波高が沿岸方向に分布を持つ場合には、最も入射波浪の大きい中央部付近で侵食量が大きくその結果、浜崖の高さが大きくなり、入射波高の小さかった両端部付近で侵食量が小さく浜崖

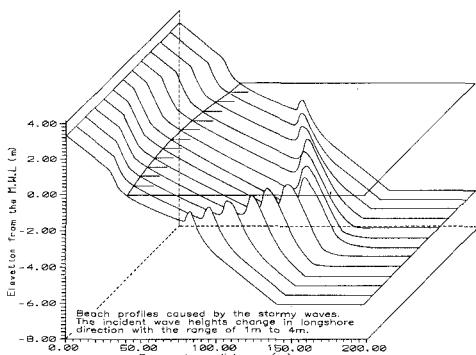


図-5 沿岸方向に分布を持つ浜崖の形成例

の高さも小さい事が分かる。また浜崖の大きさと対比して、汀線と浜崖の頂部ラインともに沿岸方向に弧状の分布を持つ事が分かる。

さらに、不規則波が入射した場合を対象として砂丘海浜断面の侵食の計算も試みたがその結果は、規則波のものよりも幾分滑らかな侵食地形となった。ただしこのモデルについてはまだキャリブレーションが必要であり、現地観測データを用いてモデルの改良を行う必要がある。

5. 結 語

現地観測により志布志海岸に形成された砂丘一海浜侵食が沿岸方向に弧状の分布を持つ事を示した。浜崖が成長するときには、基部が洗掘される間に上部の土塊にクラックが入り、それが方塊状に崩落する様子が観測により示された。また、侵食部に隣接した前浜勾配の緩やかな海浜部では浜崖が生じていなかったので、数値計算により斜面勾配の影響を調べた。その結果、斜面勾配が大きいほど浜崖が形成され易くその規模も大きい事が分かった。これには斜面勾配が効いてくる週上高さの違いが影響していると思われる。次いで、砂丘一海浜の複合断面を対象として、水位の上昇を考慮した数値計算を行い水位上昇量が大きいほど砂丘の侵食量が大きい事を示し

た。本研究ではまだ、波浪、海浜流等に関する観測が十分に行えず、外力条件に対する考察を十分行う事が出来なかつた。

謝辞：本研究は鹿児島大学による平成5年度学内特定研究経費の援助を受けて行われており深湛の謝意を表します。

参 考 文 献

- 佐藤道郎・小部直人（1983）：バー型海浜における不規則波の碎波変形、第30回海溝論文集、pp. 104-108.
- 永井紀彦（1994）：ナウファスによる波浪環境モニタリング、土木学会誌、第79卷、第3号、pp. 30-31.
- Dally, W. R., R. G. Dean, and Darlymple, R. A., (1985): A model for breaker decay on beaches, 19th ICCE ASCE, pp. 82-98.
- 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.
- Goda, Y. (1985): Random seas and design of maritime structures, Tokyo, University of Tokyo Press.
- Hughes, S. A. and T. Y. Chiu (1981): Beach and dune erosion during severe storms, Dept. of Coastal and Oceanographic Engineering, University of Florida, Gainesville, Florida.
- Kriebel, D. L. and R. G. Dean (1984): Beach and dune response to severe storms, Proc. 19th ICCE, ASCE, pp. 1584-1599.
- Kriebel, D. L. (1990): Advances in numerical modeling of dune erosion, Proc. 22nd ICCE, ASCE, pp. 230 4-2317.
- Larson, M. and N. C. Kraus (1989): SBEACH: Numerical model for simulating storm induced beach change. Report 1. Empirical foundation and model development. Technical Report CERC-89-9.
- Moore, B. D. (1982): Beach profile evolution in response to changes in water level and wave height, M. S. thesis, University of Delaware, Newark, Delaware.
- van de Graaff, J. (1977): Dune erosion during a storm surge, Coastal Engineering, Vol. 1, pp. 99-134.
- Vellinga, P., (1983): Predictive computational model for beach and dune erosion during storm surge, Proc. Coastal Structures '83, Washington DC, pp. 806-819.
- Vellinga, P., (1986): Beach and dune erosion during storm surges, Delft hydraulics communication No. 372