

海浜と砂丘の締めり度に関する研究

西 隆一郎* ・大見 真治**・佐藤 道郎***
宇 多 高明****・N. C. Kraus*****

1. ま え が き

侵食・堆積傾向を含む海浜の物理環境を表す指標としては、一般に底質粒径、海浜勾配、鉱物組成等が用いられる。例えば、底質粒径が細かいほど砂が移動しやすく、その結果侵食性が高くなる。逆に、粗ければ砂移動の限界シールズ数が大きくなるので侵食されにくくなる。また、底質粒径が細かいと海浜勾配は緩やかになり、粒径が大きくなるにつれて海浜勾配が急になる。これらの関係は、古くは Bascom や Wiegel らにより指摘されていた。その後、1977 年に Dean により、海浜の平衡断面($h = A\gamma^{2/3}$)が底質粒径と沈降速度の効果を陰に取り込んだ定数 A を用いて定式化されている。このような岸-沖漂砂に加えて、沿岸方向の重鉱物分布や粒径分布より、沿岸漂砂の卓越方向を特定しようとする試みも行われており、このような指標が海岸調査上有効指標となることが知られている。

しかし、堆積性の波浪の作用下でバームが形成される場合、汀線近くでは非常に軟かな砂の堆積が見られるし、また、海浜上を人や車が通る時に、砂面のより固い所が選ばれるなど、海浜の締めり度も重要な指標になると考えられる。更に、SUPERTANK プロジェクトでは、締め固めた砂でできた砂丘模型と、締め固めずに作成した砂丘模型の侵食実験を行ったところ、締め固めた砂丘の侵食量が少なく、締め度が侵食量を減少させる因子となる事が、図-1 に示されるように見出された。

例えば、養浜等の締めり具合は、非常に柔らかいものから、パイプレータや薬液注入などにより固形と言えるほど固いものまで変えることが可能であろう。その場合に、岸-沖漂砂や、沿岸漂砂のシステムには柔らかい砂浜の方がより多くの底質供給を行えるが、暴浪、津波、高潮等に対する防御システムとしては、固い砂浜の方が耐久性が高いと思われる。これは養浜だけでなく、高潮等から海岸背後地を護るために設置される人工砂丘で

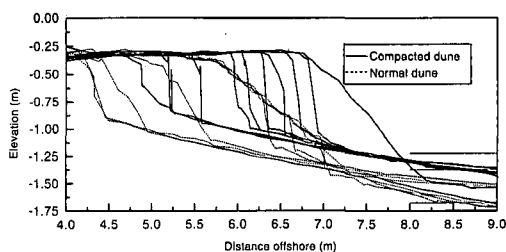


図-1 締め固めた砂丘と締め固めていない砂丘の変形

も、同様なことが言えよう。ただし、海岸管理の面からは、締めり度を考える上で、生物の生息、営巣条件や親水性も併せて考慮する必要がある。

海浜の締めり度 (compaction) に関しては、Hodgin (1992) による、養浜砂の締めり具合と海亀の営巣に関する考察があるが、定量的な研究は見当たらない。

そこで、本論文では、底質粒径等の指標に加えて、新たに砂浜や砂丘表層の締めり度 (compaction) を海岸の物理特性を示すパラメータと考え、海浜・砂丘の締めり度を現地計測する装置を考案し、この装置により、海浜の岸-沖方向・沿岸方向の締めり度 (compaction) の分布、堆積・侵食域での締めり度の分布、浜崖面における締めり度の分布、ビーチカスプ上での締めり度の分布等を計測し、地形情報との比較を行うことにした。

2. 締めり度の計測方法

締めり度を計測するには、 N 値等の土質標準試験を用いることも可能と思われるが、植物や灌木の根で覆われていたり、急斜面になっているような現地の海浜や砂丘上で計測を行う場合には、使用性の点で問題があると考えられたので、現地の海浜・砂丘の締めり度を測定するために写真-1(a), (b) に示すような 2 つの計測装置を新たに考案した。そして、本研究では、現地での計測性を考慮し、締めり度として計測した貫入量 (cm) や、重りによる沈下量 (cm) を用いることにした。

砂丘・海浜の締めり度を計測する場合に、緩やかな砂斜面の締めり度を計測するのみであれば、(a) に示すように重りを砂浜においた円筒内で自由落下させることに

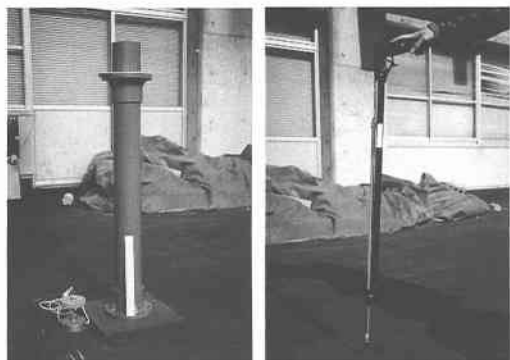
* 正会員 工修 鹿児島大学助手 工学部海洋土木工学科

** 正会員 (株)近藤組

*** 正会員 工博 鹿児島大学教授 工学部海洋土木工学科

**** 正会員 工博 建設省土木研究所河川管理総括研究室

***** Ph.D. Prof. Texas A & M University-Corpus Christi



(a) 沈下型

(b) 貫入型

写真-1 締まり度の計測装置

より生じる砂面の沈下量を測り、この値を締まり度とするものがごく表面付近の漂砂や飛砂の効果を調べるのに適していると思われる。そして、砂丘のような斜面や、浜崖のほぼ垂直な面、そして、植生で覆われた斜面の締まり度を計測するには、(b) に示すように打ち込んだ矢の貫入量を測る水中銃式のものが砂の表層数十 cm 内の締まり度を測るのに適していると考えられた。また、後述するが、飛砂で被覆された数十 cm の砂層のせん断強度もトルクを測る装置を用いて計測した。今回は、締まり度が砂丘や浜崖の特性を表すパラメータとしてどの程度有効なのか調べることを主眼とする。

2.1 計測装置の概要

写真-1(a)の装置は、筒の内径 10 cm、長さ 1 m の塩化ビニール製で、下部には装置の荷重が締まり度の測定ポイントに影響を与えずかつ装置が自立できるように、矩形的支持板を取り付けて、砂浜表面との接触面積を大きくしてある。この筒の上部から円筒内を落下させる重りは、材質が真ちゅうで重量が 2 kg、そして、筒を動かさず連続して重りを数回自由落下させられるように、重り上部面に紐を付けてある。写真-1(b)の装置は水中銃で、測定値を読み易くするように、矢に巻尺用のメジャーを切って張り付けてある。

2.2 計測方法

写真-1(a)の重りを自由落下させ、砂表面の沈下量を計る装置では、高さ 1 m の位置から 2 kg の重りを 5 回自由落下させ、その平均をとる測定方法を使用した。このように重りを自由落下させ、砂浜表面の沈下量を測るタイプの装置は、緩勾配の海浜斜面を計測するのに適しており、また、 N 値等の土質標準試験とのキャリブレーションが行い易いのではないかと考えた。また、写真-1(b)の水中銃タイプの装置では、測定箇所を円を描き、60 度間隔で点を取り、砂表面から約 10 cm 上部の位置から垂直に矢を 6 回撃ち込み、極端に測定値が異なった場合を

除外して平均を求めるようにした。このように先端部が尖った物を地面に撃ち込んで貫入量を測るタイプの装置は、砂丘の急斜面や、浜崖のほぼ垂直に近い面での締まり度を計測できるのに加えて、普通の砂浜表層の締まり度の計測も、短時間で容易に行える利点があると思われる。

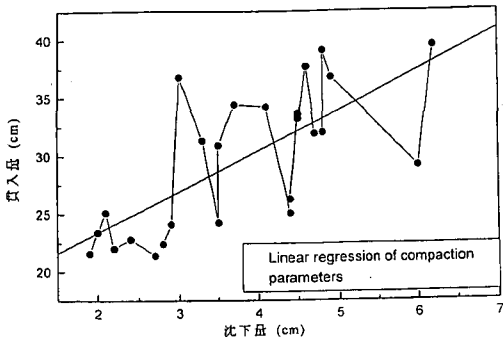
計測の初期段階では、これら 2 つの計測装置を併用して現地海浜の締まり度の計測を行った。ただし、貫入型の (b) に対し、沈下量を測る (a) の装置は、通常、波の作用を受けている地域では、砂表面が湿っているために精度の高い測定値が得られるが、台風など暴浪の時にしか波の作用を受けないような後浜（海浜上部）では、海浜表面が乾燥した飛砂で覆われているために、重りが落下したときに円筒内で圧縮される空気、表面砂が飛び散ることがあった。加えて、風の強い状況下で沈下量を物差しで計る場合、重りによる沈下でできた穴がすぐに飛砂で覆われこともあった。そのために、沈下量を測るタイプのものは、精度の高い測定値を得にくい場合があった。したがって、後述する締まり度については (b) の装置による測定値を中心に考察を進める。

2.3 測定値の比較

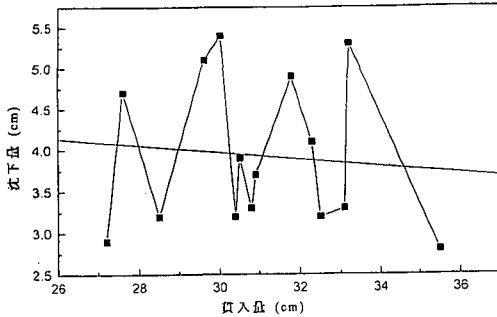
最初にそれぞれの測定法による計測値の比較を行った。装置 (a)、(b) による締まり度の計測データの相関を調べるために、鹿児島県薩摩半島先端の開聞岳西側に位置する物袋（もって）海岸で計測を行い、それぞれの計測値の比較を行った。まず、計測データを計測時期に週上波の作用を受けている前浜部分と、計測時には波の作用をほとんど受けておらず、砂表面が乾いて飛砂や雨などによる風化の影響が大きい後浜の 2 つの領域に分け解析を行った。図-2(a)、(b) に、それぞれの領域の測定値を示す。また、それぞれの領域で相関係数も算出した。

図より、計測時期に波の作用を頻繁に受けている前浜部分では、両測定装置によるデータは傾向が似ており、更に、相関係数は $r=0.7$ と両者の相関は良い。しかし、図-2(b) に示すように計測前に潮位変動のある条件下で波がほとんど作用せず、雨や風による風化で砂表面が非常に柔らかい後浜領域では、相関係数 $r=-0.1$ と、海浜表面数 cm の砂層と、その下数十 cm の砂層の締まり度の傾向が、異なっていることが分かる。

これは雨や風による飛砂の影響が卓越する砂浜領域では、ごく表面近くの部分が柔らかく、内部が締まっている場合があるので、この様な場所においては両者の相関が悪いと考えられる。様々な環境条件を有する海岸地形での使用性と測定値の精度、更に計測に要する時間を考慮すると、砂浜あるいは砂丘の強度を論ずる場合には、少なくとも短期間の高波浪による侵食深さのスケールと



(a) 遡上波作用の卓越領域 (前浜領域)



(b) 飛砂の卓越領域 (後浜領域)

図-2 締まり度の比較

対応する貫入量を測るタイプの締まり度を採用して良いと思われる。

3. 締まり度の計測

締まり度は、様々な物理環境を表す有効なパラメーターではないかと考え、前節で述べた装置を用いて砂丘上での測定、沿岸漂砂に起因した侵食域と堆積域での測定、浜崖近傍での測定、ビーチカスプ上での測定等を行った。測定結果は以下のである。

3.1 吹上砂丘での締まり度

吹上砂丘において、砂丘林境界から岸-沖方向 100 m の区間内で、締まり度を測定した。特に、砂丘断面内の 0 m から 40 m の砂丘表面は灌木や植物で被覆されているために、沈下型の装置が使いにくく、貫入型の装置に比べて測定できない箇所が幾つかあった。この周辺は、植物の根などにより浜より締まっているように踏査時感じられた。しかし、貫入型での測定結果は、図-3 に示すように人により踏みならされた 60 m 付近を除いて、砂丘部で締まり度が緩い結果が出ている。

沈下型の装置での計測結果に関しては、砂丘部で得られたデータは踏査時に感じた感覚に近く、砂丘部が締まっている。また、浜や浜崖付近では貫入型の測定結果と非常に類似した傾向を示しており、浜付近ではと

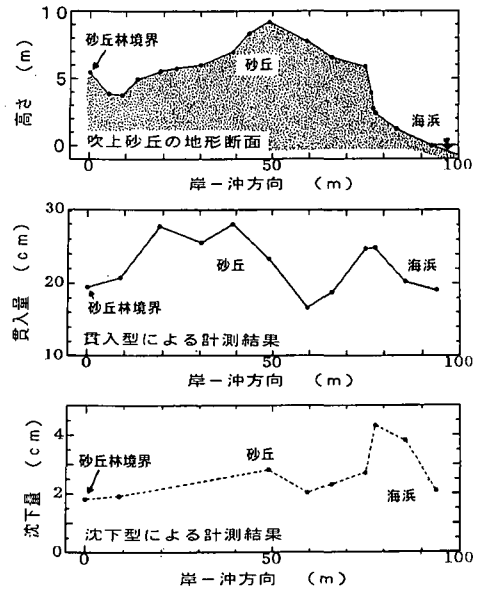


図-3 砂丘断面の締まり度の分布

もに締まり度が大きく、浜崖上部付近で締まり度が緩くなっている。

3.2 侵食域と堆積域での締まり度の分布

沿岸漂砂の不均衡がある海岸では一つの漂砂系の中に堆積域と侵食域が形成される。この時、侵食域においては粒径が粗く締り度が高く、堆積域においては表面粒径が細かくて締り度の低い軟らかな海浜が形成されと考えられる。そこで、沿岸漂砂の不均衡により、侵食域と堆積域が形成されている志布志湾に面した柏原海岸で、侵食域と堆積域に測線 1, 2, 3, 4 を設定し、地形測量を行い、その後、汀線付近を中心に岸-沖方向に各測線上で、締まり度を測定した。測定時の汀線での、貫入型の装置を用いた結果を図-4 に示す。

この図から分かるように、侵食域と堆積域とは締まり度に違いがある。したがって締まり度により、侵食域と堆積域とが区別出来るようになれば、数 100 m, 数 km といった長い海浜で、侵食域と堆積域を比較的簡便に区別出来るこの方法は、底質分析、重鉍物分析、地形測量

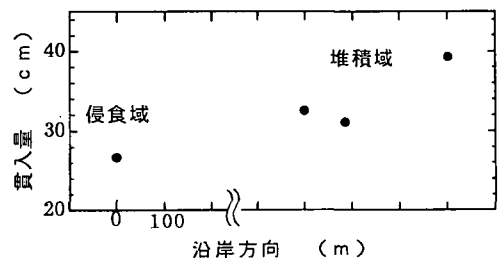


図-4 侵食域と堆積域の締まり度の分布

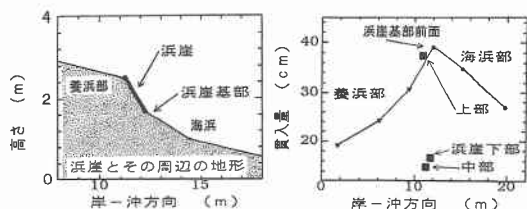


図-5 浜崖斜面における締まり度

に比べると、手間やコストがかからずに済むと考えられる。

3.3 浜崖斜面における締まり度

柏原海岸の侵食域で形成されていた浜崖斜面と、その周辺地形の測量を行い、浜崖周辺と浜崖断面で両方の計測装置を用いて締まり度の測定を行った。

貫入型での測定結果を、図-5に示す。浜崖断面での測定値は、断面に垂直に水中鉋を向けて、10 cm ほど離して撃ち込んだ時の測定値である。図を見て分かるように浜崖上部では、締まり度が非常に緩いのにに対し、浜崖中部、下部は締まり度が非常に大きくなっている。これは上部での砂の重さによる圧密と、遡上波が衝撃的に垂直に切り立つ浜崖斜面に作用するために、浜崖基部での締まり度が高くなったものと思われる。

また、浜崖の基部前面において、締まり度が非常に緩かったのは、崩壊した浜崖の砂が、浜崖基部に堆積するためと考えられる。

3.4 ビーチカスプでの締まり度

2 段ビーチカスプのある薩摩半島先端の物袋海岸で地形測量を行い、その後、それぞれ2段ビーチカスプの Apex と Bay 部をカバーするように設置した測線上で、締まり度の計測を行った。計測場所は、図-6 示すような形状をしている。沿岸方向に 42 m の広がりを持ち、一段目のカスプは峰頂部から次の峰頂部までの1波長分、そして、2 段目のカスプは峰頂部から始まり2波長のカスプを取り込むように測線 1, 2, 3, 4, 5, 6 を設定し、締まり度の測定を行った。貫入型による測定結果を図-7に示す。

図-7に示すように、どの測線とも図中 36 m 付近の汀線付近が最も締まり度が大きくなっている。計測時には1 段目のカスプには波が遡上するような状況になく、2 段目のカスプが遡上波の影響を受ける位置にあり、カスプの境界が岸-沖方向に 15-20 m の所にある。2 段目のカスプでは、測線 1, 3, 5 が Apex 部に、2, 4 が Bay 部にあるが、Bay 部の方が締まり度が全体的に大きいことが分かる。また、1 段目のカスプでは、Apex 部にある測線 1 と 6 の締まり度が Bay 部にある測線よりも締まり度が緩い傾向がある。しかし、同じ Bay 部にある測線 4

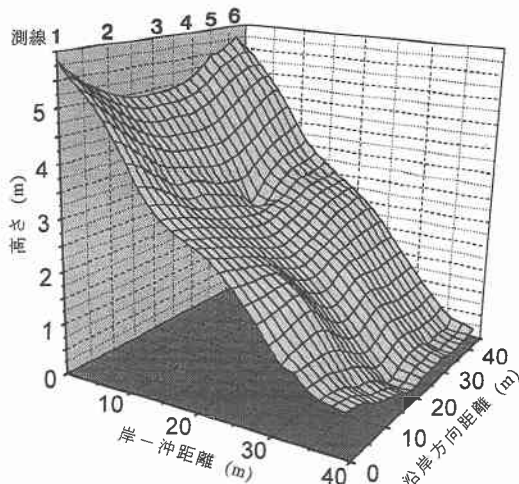


図-6 ビーチカスプ地形 (物袋海岸)

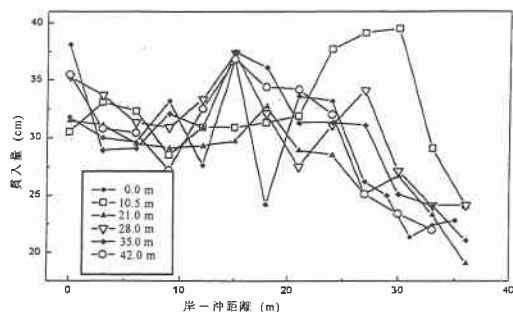


図-7 ビーチカスプ上での締まり度の分布

は、逆に締まり度が小さくなっていった。また、岸-沖方向には締まり度が緩いことを示すピークが、1 段目と2 段目のカスプの境界付近にあり、カスプが形成される時に、この辺りに砂が堆積したことを示していると思われる。

全体的には Bay 部の締まり度が高い結果が得られたが、これは通常時において apex 付近が遡上波による砂の堆積が生じやすく、bay 部分では周りよりも高度が低く遡上波が backwash 時に砂をもっていきやすい状況にあるために、締まり度が大きく表面の底質粒径も粗いと考えられる。

3.5 砂表面の締まり度について

前述した二つの測定器に加え、砂層のせん断力を計る装置を用いた計測も若干行なった。この計測器は、砂表面に 5 cm ほど差し込み回転させてトルクの大きさ (kgf・cm) を測るものである。この装置は、砂表面 5 cm 程の締まり度を測るものなので、沈下型の計測器同様に、飛砂に覆われている所では空回りしやすいが、植生被覆の激しい所では、植物の根や灌木の根を含めて締まり度の大

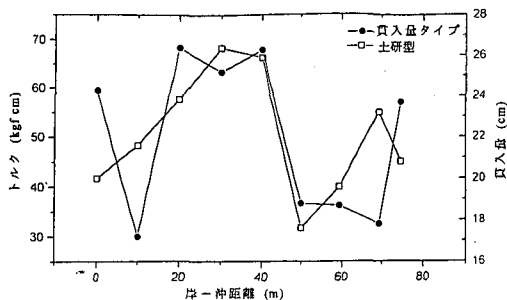


図-8 セン断力の分布

きを考慮できるところ利点がある。

現地でこの計測器を使ったとき、どんどん回転させていくと植物や根が絡んでモーメントの値が大きくなっていき、最終的には根が切れるまでトルクが上がるが、ここでは、回転させた初期段階での値を図-8に示す。なお図中には貫入型で計った値も示してある。

4. 結 論

本研究では幾つかの異なる環境下での海浜・砂丘の締めり度に関する計測を行った。その結果、締めり度がそれぞれの海岸地形の特性を表す指標として用いられる可能性があることが分かった。今回、測定に用いた装置では海浜・砂丘の高々数十 cm の表層部分しか計測していない。しかしながら、貫入型の装置では、計測していない砂丘内部についても傾向をとらえているのではないと思われる。加えて、異なる海浜・砂丘の同一測線上で、季節などを変えて定期的に海浜形状と締めり度の計測を行えば、計測地点の砂層の鉛直方向特性を考察できる可能性がある、出てくるとと思われる。

また、今回は締めり度が砂丘や海浜の特性を表すパラメータとしてどの程度有効なのか計測装置を考案し、その応用の可能性を探ることに主眼を置いたために、JISで定められた土質実験法と比較した計測器のキャリブレーションや、厳密な精度の評価を行なっておらず、それは今後の検討課題として残されている。さて現地計測で得られた結果を列挙すると以下ようになる。

(I) 砂丘の締めり度分布；踏査時に植物の根などにより砂丘表面が海浜より締まっているようであった。これは、図-2に示した砂丘林境界から汀線までの、岸沖100 mの区間での沈下量の計測値と一致している。これに対し、貫入量タイプのもので計測した砂表層数十 cm の締めり度は、良く踏みならされている砂丘部分を除き、

砂丘上で締めり度が緩い結果が得られた。

(II) 堆積域と侵食域での締めり度の分布；図-3に示す侵食域と堆積域の汀線位置での締めり度の分布によれば、堆積域での砂の締めり度が緩く、侵食域では固いことが分かった。このことは、締めり度が海浜の侵食・堆積状況の判断材料の一つに使える事を意味している。

(III) 浜崖面における締めり度の分布；図-4に示す浜崖が形成されている海岸での汀線近傍の締めり度から、浜崖面基部で締めり度が非常に高く、浜崖直前の海浜で締めり度が緩い事が分かる。これは、波の浸食作用の結果として、汀線近傍に垂直に近い斜面が形成されるために、浜崖面には過去の圧密沈下作用を受けた固い地層面が露出し、その結果、隣接する緩傾斜斜面より浜崖面の締めり度が高かったと考えられる。一方、浜崖の基部前面には、崩壊した砂が堆積するために浜崖面に比べて締めり度が緩くなったと考えられる。

(IV) ビーチカスプでの締めり度；2段のビーチカスプのある海浜で Apex と Bay 部の砂の締めり度を計測した結果、この海岸では飛砂が卓越している一段目のカスプで、沈下量と貫入量の相関は悪かったが、遡上波の作用する2段目のカスプでは両者の相関は良いことが分かった。また Bay 部での締めり度のほうが、Apex 部での締めり度より高かった。

以上の結果より、締めり度が砂丘・海浜の堆積・侵食状況を判断するときの一指標となることが分かった。さらに、このような結果を見ると、自然の防御構造物としての砂丘強度を高めるためには、砂丘の締めり度を高めることが有効な手段であることも分かる。また、砂丘や海浜の侵食の計算を行う上で、漂砂量式に締めり度の効果を取り込んだ係数を付加する必要もあるはずである。そこでは締めり度が高いほど漂砂量が小さく、逆に締めり度が小さいほど漂砂量が大きくなるはずである。今後、締めり度と締めり度に起因する漂砂量係数の関係について検討したいと考えている。

参 考 文 献

- Derek A. Hodgins, Clifford Truitt and Jerris Foote, (1992): Beach compactness regulatory criteria for nesting sea turtles on the Southwest Florida Shoreline, Proc. of 5th Annual National Conference On Beach Preservation Association Technology, pp. 325-339.
- Kraus, N. C. and J. M. Smith, (1994): SUPERTANK laboratory data collection project, Technical Report CERC-94-3, US Army Corps of Engineers.