

波向の季節変動を有する海岸における人工リーフの最適配置法

——薩摩半島南部の長崎鼻海岸の海岸災害をもとに——

西 隆一郎* ・ 佐藤 道郎** ・ 宇多 高明***
 兒島 優一**** ・ 山元 茂教*****

1. ま え が き

薩摩半島南端には景勝地として名高い長崎鼻があり、それに隣接して延長約1.2 kmの長崎鼻海岸が延びている。この海岸の背後地は霧島屋久国立公園内にあるために、景観保護が重要な上に、海亀の産卵地としても有名である。さらに、この海岸は波向の季節変動により沿岸漂砂の方向が変化することで特徴付けられる。すなわち、南東端の長崎鼻側で汀線が前進する場合には、北西端の村石岬側が侵食され、波向が逆転すればこの逆の変化が生じる、という海浜地形変化を繰り返してきた。しかし、外洋に直接面した海岸であるために、台風等による高波浪により徐々に侵食が進み、後浜にある崖面にまで波の作用が及び、最近ではこの崖の侵食も目立つようになってきた。このため蛇籠や緩傾斜護岸を用いた海岸保全施設の建設も行われたが、継続的に高波浪の作用を受ける海岸であること、また通常ポケットビーチで見られる波向変動に伴う汀線変化 (swing) が大きいことから、これらの保全施設はたびたび被災を受けてきた。

これまで、ポケットビーチ等の比較的安定した海浜で、台風等の高波浪により後浜で侵食が発生した場合、侵食対策として堤防や緩傾斜護岸等の保全施設が施工されることが多かった。しかし、このような施設はもともと陸域に造られるために、漂砂を制御する意味からは消極的な効果を持つに過ぎない。また、前浜上にコンクリート性海岸構造物を設置することは、景観や親水性を阻害することから住民の理解を得にくくなりつつある。そのため最近では海浜の沖合に人工リーフ等の構造物を設置して、入射波浪のエネルギーを減衰させ、高波浪による海浜の被害を制御する工法の採用が増えつつある。

この種の海岸構造物は、一般には沿岸漂砂の下手から施工するのが常識とされているが、ポケットビーチ等の安定海浜では、経年的に見れば沿岸漂砂の卓越方向は存在せず、汀線形状の季節的な変動に対応して沿岸漂砂の

方向が変わり、漂砂の上手・下手の定義自体が無意味となる。そのために、どのような位置 (順序) で施設の施工を進めればよいのかとの疑問が生じる。ここでは、長崎鼻海岸を実例として、波向変動に対応した汀線変動を持ちながらも、比較的安定した海岸の沖合に海岸構造物を設置する場合の構造物の施工方法を、沿岸漂砂の機構と絡めて議論する。

2. 長崎鼻海岸の概要

長崎鼻海岸は、図-1に示すように薩摩半島の南端に位置し、北西～南東方向に伸びる海岸線のうち、南東端を長崎鼻により、北西端を村石岬により区切られた延長約1.2 kmの海岸である。この海岸の構成材料は、浜に存在する黒色の火山岩質砂礫と、背後の崖に分布する黄土色の火山性噴出物である。

この海岸の前浜材料の平均的な粒径は、海浜中央付近の測線 No. 8 の D.L.=0 m で $d_{50}=0.83$ mm、比重は 3.06 と、通常の砂浜の底質の比重 2.65 より大きい。また、海浜の平均勾配は、前浜で約 1/8、沖浜の -3 ~ -10 m では約 1/40 であり、それより沖側ではカルデラ地形に伴う急深海岸となる。さらに、後浜背後には高さ 7 m ほどのボラ層でできた未固結性の崖が形成されている。この海岸は、1976 年に台風に伴う災害を受け、長さ 320 m にわたり、蛇籠と緩傾斜護岸を用いた災害復旧がなされた。その後も、1987 年、1989 年、1990 年、1991 年、1993 年と台風による災害を受け続け、その都度蛇籠と緩傾斜護岸を用いた災害復旧工事が行われた。

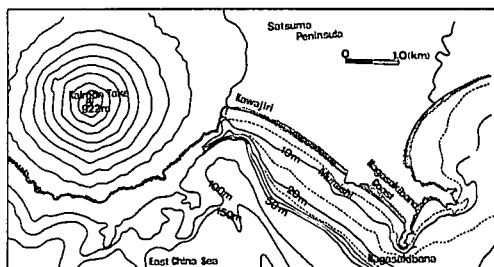


図-1 長崎鼻海岸の位置

* 正会員 工修 鹿児島大学工学部海洋土木工学科助手

** 正会員 工博 鹿児島大学工学部海洋土木工学科教授

*** 正会員 工博 建設省土木研究所河川部長

**** 鹿児島県土木部河川課主査

***** (株)新日本技術コンサルタンツ課長

しかしながら、これらの海岸保全施設の設置にもかかわらず、景勝地の重要な要素である海岸背後の松林等も高波浪による侵食被害を受けるようになったことから、入射波浪のエネルギーを沖合で減衰させる必要性が高まり、人工リーフ（暫定形）の施工が被災の程度の大きい海岸の北西端で1989年に始められ、1996年5月に一基目が完成した。この人工リーフの施工に伴い、リーフ背後では堆砂が進み、また海浜中央部においては浜幅が減少し始めた。一基目の人工リーフの完成後の台風6号と12号に伴う高波浪により、北東端の人工リーフ背後ではさらに堆砂が進み、汀線が最大で約18m前進した。これに対して、海浜中央部付近では、リーフ背後に砂が運び去られた結果、前浜幅は約10m狭まり、緩傾斜護岸および蛇笥が586mにわたり被災した。その結果、この付近は将来的に高波浪による海岸被害が憂慮される状況となった。この海岸では、今後順次人工リーフが海岸全域に3基施工される予定であるが、人工リーフの施工に関連した汀線変動量を抑制するための施工方法、とくに人工リーフの施工順序について十分な検討の必要性が生じた。

3. 気象・海象条件

この海岸の汀線は、卓越波の波向変動に応じてシーソー状に変動している。図-2には、汀線変動を引き起こす主要な要因である波向変動に関する気象データとし

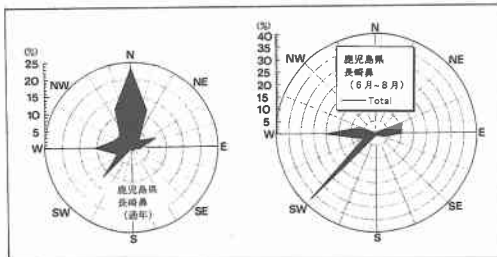


図-2 年間を通しての風配図

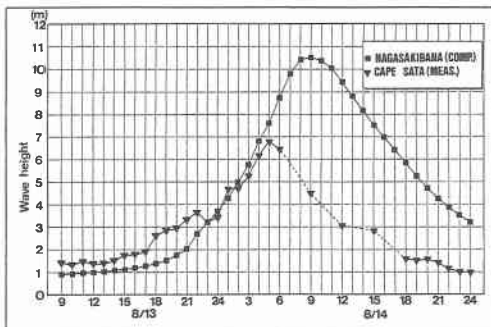


図-3 台風12号に伴う波浪推算

て、長崎鼻近傍に位置する川尻漁港での1995年から1996年の通年の風配図と、特に大型の台風が来襲した夏季の風配図を示す。これによれば卓越風向は、主として冬季に発達するN～NWと、夏季を中心とするSW方向であり、年間を通してE～SSW方向の風がほとんど吹いていない。また、外洋に直接開いているために、夏季の台風に伴う波浪は顕著なものと考えられる。そこで、崖部の侵食の主因となった1996年の台風12号にともなう佐多岬の波浪の観測値と、当海域での波の推算結果を図-3に示す。

4. 長崎鼻海岸の海浜過程

4.1 空中写真の比較

波向の季節変動により汀線形状が変動する状況を空中写真から調べてみる。まず、写真-1は、1988年撮影の空中写真である。写真の左端が村石岬、右端が長崎鼻である。これによると、村石岬の付け根の前浜幅は、長崎鼻付近の前浜幅と比較して非常に狭くなっている。写真-1の撮影時期は春先であって、冬季の季節風に伴う西側からの波浪の作用を受けたため、上述の汀線形状になったと考えられる。同様に写真-2には、1996年10月17日撮影の空中写真を示しているが、この写真では村石岬の付



写真-1 長崎鼻海岸の汀線（1988年撮影）



写真-2 長崎鼻海岸の汀線（1996年10月17日撮影）

け根の汀線が大きく前進している。これは台風12号に伴う高波浪が南東側から作用したためである。ただし、写真-2ではすでに人工リーフが設置されているために、それによる効果も一部含まれている。

4.2 人工リーフの建設に伴う海浜変形

1996年5月、この海岸では村石岬側に人工リーフが暫定施工された。人工リーフは天端高がT.P.-1.5m、天端幅が20m、沿岸方向の長さが200mであって、約-6mに設置された。人工リーフ設置前の1989年と、設置後の1996年9月の深浅図をそれぞれ図-4、5に示す。まず、図-4によれば、前浜から-4m付近までの等深線は非常に密集しており、これらの等深線には一体的な移動が見られる。このことから、波による地形変化の限界水深(宇多, 1997)はほぼ-4m付近にあると推定される。台風来襲後の図-5によれば、人工リーフの背後では-6mまでの等深線が前進し、その東側では局所的な後退も見られる。さらに、人工リーフの背後だけでなく、人工リーフと村石岬の間の開口部も含めて、等深線が前進する一方、No.1~No.8の広い範囲でD.L.=0.0mの等深線が後退していることが注目される。加えて、人工リーフ未着工区域沖合いの、深さ-5mから-10mまでの岸沖漂砂による等深線の沖側への移動に比べて、リーフ設置区

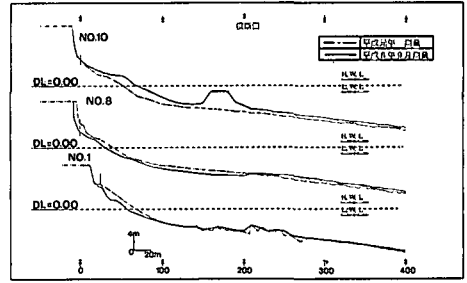


図-6 海浜縦断形の変化比較

域沖合での同等深線の沖側への移動は顕著であり、沿岸漂砂によりリーフ設置区間に輸送された底質の内、細粒分がこの海域に運ばれて堆積したものと考えられる。以上の海浜変形の結果、人工リーフ背後域において汀線が18m前進し、中央部の侵食域では最大で約10m後退した。

図-6には、代表測線における海浜縦断形の変化を示す。台風12号時の入射波浪に対して、長崎島による回折域に入るものの、固定境界に近いNo.1では、前浜から-2.6mの範囲で侵食されている。海浜中央部のNo.8は、高波浪が直接的に作用する区域であり、かつ人工リーフ背後への主な底質供給域となっているために前浜幅が狭くなった。同時に、前浜上部にある松林基部まで侵食され、浜崖が形成された。浜崖構成材料は火山性噴出物であり、軽石状の物からシルト性のものまで幅広い粒度分布を持つために、中央粒径1.8mmと崖前面の底質粒径より大きくないが、底質比重は2.84で崖前面の砂浜の底質比重の3.06~3.47に比較して軽い。このために、この海岸の入射波浪条件は、この崖部から供給されたほとんどの底質が前浜に存在できる限界値を越えている。実際、崖部の底質と前浜部の底質は鉱物組成のため色が全く異なり、目視による識別は容易であるが、前浜上と沖浜で採取した底質サンプル内には黄土色の崖部の底質がほとんど含まれていなかった。このことは崖からの生産土砂はほとんど沖合へと流失したか、高波浪の遮蔽領域である人工リーフ背後の前浜へ堆積したと考えられる。また、静穏時の波ではこの崖侵食部まで波が到達することはないので、波による前浜上部の海浜回復が起こらず、非可逆的变化が生じると言える。

人工リーフの背後のNo.10では、高さ約2.6mのバームが形成され、大量の土砂が堆積している。以上のように、ポケットビーチの南東端付近のNo.2で侵食、北西端のNo.10で堆積という対照的な変化が生じた事が分かる。

4.3 底質特性

人工リーフの中央部の測線、最も侵食が著しい測線、

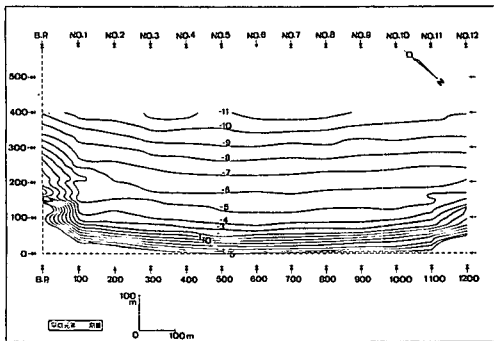


図-4 深浅図 (1989年)

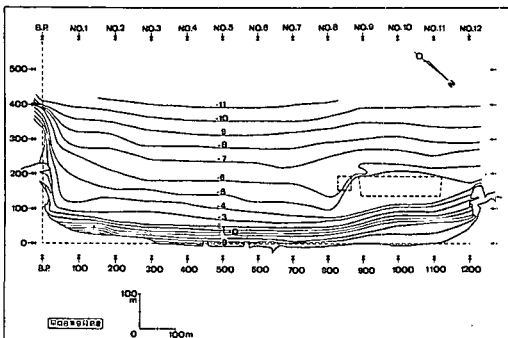


図-5 深浅図 (1996年9月)

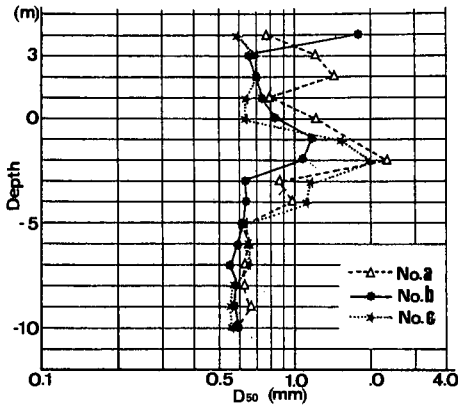


図-7 底質中央粒径の水深方向分布

そして、長崎鼻付近の測線 (a), (b), (c) 上で岸沖方向の底質サンプリングを行い、粒度、比重、中央粒径の分布を調べた。図-7に、それぞれの測線での中央粒径の水深方向分布を示す。巨視的には、各測線とも D.L. = -1.0 ~ -2.0 m に中央粒径のピークがあり、遮蔽領域では 2.3 mm、長崎鼻側では 1.95 mm、そして、侵食領域では 1.18 mm となっている。また、D.L. = -3.0 m 以深で海浜勾配が 1/40 になっている海底部では d_{50} は急激に小さくなり、しかも水深によらずほぼ 0.6 mm 程度の粒径となる。さらに、侵食部の浜崖基部に溜まっている崩壊土砂は、火山性噴出物で軽石からシルトを含めた幅広い粒度分布を持つために、その他の 2 側線で通常の波が作用しない崖基部で取った底質の中央粒径 0.58 ~ 0.75 mm に比べ、中央粒径が 1.83 mm と大きくなっている。一方、海浜を構成している黒砂の比重 3.06 ~ 3.47 に比較して、浜崖部の崩壊土砂の比重は 2.84 と軽くなっている。

4.4 変化土砂量の計算

人工リーフ背後の堆積域のバーム高さを 2.6 m、沿岸漂砂による地形変化の限界水深を -4 m とすると、土砂の移動高さは 6.6 m となる。そして、堆積域の幅を 300 m、汀線の前進量を最大で 18 m とし、堆積域の平面形状を三角形で近似すると、約 $1.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ の土砂堆積となる。すなわち、これと同量の砂が隣接海浜から消失したことになる。したがって人工リーフ未着工の隣接海浜で蛇竜および緩傾斜護岸が被災を受けた砂浜延長を 586 m、砂の移動高さを 6.6 m とし、侵食域全体の平均的な汀線後退量を算定すれば、(堆積量)/(砂の移動高さ×砂浜延長)より、約 4.7 m 構造物の設置に伴い後退したことになる。ただし、これは概算であり人工リーフの隣接海浜ほど汀線後退量が大きく、海浜南東端部ではリーフ設置に伴う後退量は小さくなる。また、これらの沿岸方向の土砂収支の他に、浜崖部からの底質供給が高波浪時に行われている。

一方、浜崖部からの底質供給量は、浜崖の高さを 7.6 m、延長を 318 m、そして後退量を最大で 4 m とし、侵食域の平面形状を三角形で近似すると、概算で $4.8 \times 10^3 \text{ m}^3$ となる。この底質はシルトから軽石状の中礫に渡る広い粒度組成を持ち、しかも、前浜の底質より底質比重が小さいために、来襲する入射波浪の下では、そのほとんどは高波浪により沖の深い水深部に運ばれてしまったと考えられる。その結果、土砂収支上では沿岸漂砂・岸沖漂砂系からほぼ失われることになり、静穏時の波による海浜回復に余り寄与しないことになる。

5. ポケットビーチでの構造物設置に伴う汀線変化予測モデル

ポケットビーチでは、波向変動に応じて汀線位置が常時変動 (swing) する。しかし、経年的に見れば海浜は安定していると考えてよい。このようなポケットビーチに、何らかの原因で生じた海岸侵食を制御するため人工リーフや離岸堤を施工する場合の海浜過程の簡単なモデル化を試みる。

5.1 現地海浜の海岸過程のモデル化

人工リーフの建設以前、長崎鼻海岸では、卓越波向の変化に応じて長崎鼻側と村石側で、汀線が前進・後退を繰り返していたと考えられる。村石側に人工リーフが設置されると、沿岸漂砂により運ばれた土砂が人工リーフ背後に堆積して舌状砂州が形成される。そして、長崎鼻側の隣接海浜では、リーフ背後の堆積土砂量に見合う分だけ汀線が後退し、この新しい平均汀線上で波向変動に対応した汀線の swing を繰り返すことになる。更に、人工リーフを建設すると (I-a) のポケットビーチにリーフを設置するのと同じことになる。

5.2 理想化された直線形状を持つポケットビーチの汀線変化の簡易モデル

境界両端を越えて底質が移動せず、しかも平均汀線が直線で表わされ、汀線の季節変動も一次関数で表わされるものと仮定して、汀線の最大変動量を求めることを考える。この時、まず端部に人工リーフを一基設置する場合と、中央部に一基設置する場合についてそれぞれ図-8, 9 に示すように考察する。

① 人工リーフを端部に設置する場合

まず、モデルにおいては海浜延長を l 、漂砂の移動高さを h_b 、汀線変動の傾き角を $\tan \theta$ とする。ここでは、長さ a の人工リーフ背後に堆積した土砂量 ΔV_1 を相殺するように、 $(l-a)$ の長さをもつ隣接海浜で平均汀線が Δy_1 だけ後退するので、両者は次式で結び付けられる。

$$\Delta V_1 = \Delta y_1 (l-a) h_b \quad \dots\dots\dots (1)$$

よって平均汀線の後退量は次式で求まる。

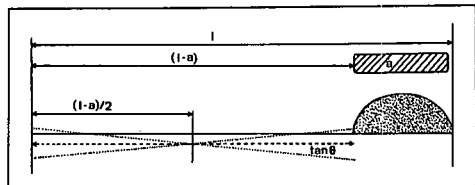


図-8 人工リーフを端部に設置する場合の汀線変化のモデル

$$\Delta y_1 = \frac{\Delta V_1}{h_b(l-a)} \dots\dots\dots (2)$$

この後退した平均汀線の上に傾き $\tan \theta$ をもつ平均汀線の変動 (swing) が重なるので、端部での変動量 Δs_1 は、

$$\Delta s_1 = \tan \theta \frac{(l-a)}{2} \dots\dots\dots (3)$$

したがって端部における汀線の可能な最大後退量 Δp_1 は、

$$\Delta p_1 = \frac{\Delta V_1}{h_b(l-a)} + \tan \theta \frac{(l-a)}{2} \dots\dots\dots (4)$$

これをリーフを設置しない場合と比較すると、端部での汀線後退量の増加分が次式で計算できる。

$$P_{\text{damage}} = \frac{\Delta V_1}{h_b(l-a)} - \tan \theta \frac{a}{2} \dots\dots\dots (5)$$

ただし、この式では、右辺の第1項と第2項の大小関係により、人工リーフ設置にともなう端部での汀線変動量に増減が生じることになる。そこで、リーフの延長を $a = cl$ で置換し、この問題について考察する。ただし、 c は0から1の範囲で変化する。上式より、右辺第1項が大きければ、汀線が付加的に後退するわけであるから、

$$\frac{\Delta V_1}{h_b(1-c)} > \tan \theta \frac{cl}{2} \dots\dots\dots (6)$$

よって、次式の2次方程式の正の根より大きければ汀線は後退し、逆に小さければ汀線が前進することになる。

$$c^2 - c + \frac{2\Delta V_1}{h_b l^2 \tan \theta} = 0 \dots\dots\dots (7)$$

② 人工リーフを中央部から設置する場合

図-9を参照すると、リーフを設置した場合の端部における汀線の最大後退量 Δp_1 は、次式で求まる。

$$p'_1 = \frac{\Delta V_1}{h_b(l-a)} + \tan \theta \frac{(l+a)}{4} \dots\dots\dots (8)$$

したがってリーフを設置しない場合と比較すると、端部での汀線後退量の増加分が次式で計算できる。

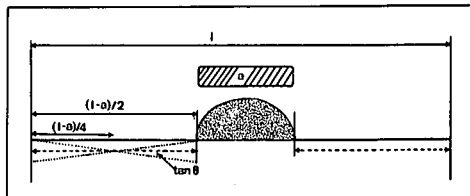


図-9 人工リーフを中央部に設置した場合の汀線変化のモデル

$$p'_{\text{damage}} = \frac{\Delta V_1}{h_b(l-a)} - \tan \theta \frac{(l+a)}{4} \dots\dots\dots (9)$$

そのために、①案と比べた場合の汀線変動量は次式で表わされる分だけ少なくなる。

$$P_{\text{damage}} - p'_{\text{damage}} = \tan \theta \frac{(l-a)}{4} \dots\dots\dots (10)$$

例えば、 $\tan \theta = 0.01$ の swing が存在する長さ 1000 m のポケットビーチに、延長 200 m の人工リーフを設置した場合には、①案が②案より 2 m 大きな汀線後退量を端部で生じる可能性がある。以上の点は、汀線変動がある海岸では、ポケットビーチの中央部から人工リーフを建設することが安全なことを示している。

ここでは、人工リーフをモデルとして考えたが、離岸堤群に対しても全く同様な原理により施工順序と汀線変動の説明ができる。このような例は各地に見られるが、典型的な事例としては、京都府の久美浜海岸での離岸堤の建設の例が上げられる (宇多, 1997)。

6. 結 論

ポケットビーチである長崎島海岸では、北西端の岬側から人工リーフの施工が行なわれたために、台風に伴う南東からの卓越波による沿岸漂砂によりリーフ背後に大量の土砂が運び込まれ、これに伴い底質の供給源となる隣接海浜では浜崖を伴う著しい侵食が生じた。一般に、安定したポケットビーチでは、沖合いに波浪減衰施設を施工する場合には、海浜の中央部から施工し、海岸線を短い区間に区分けした方が、汀線の最大変動量、ひいては側方境界 (岬部) での侵食に伴う被害を低減できることが示された。

参 考 文 献

宇多高明 (1997): 日本の海岸侵食, (株)山海堂, p. 460.