

海食崖と砂浜との境界部付近における 海浜変形に関する実験的研究

宇 多 高 明*・山 本 幸 次**

1. 目 的

近年、全国各地で海岸侵食が問題となっているが、その原因の1つに河川や崖海岸からの供給土砂量の減少があげられる(宇多, 1990)。河川流出土砂量の変化と河口周辺での海浜地形変化の関連については、河口砂州の消長などの観点よりいくつかの研究がなされている(例えば、藤井ほか, 1990; 宇多ほか, 1992)。しかし、崖海岸からの供給土砂量とその隣接海岸における海浜変形との関連については、ほとんど研究例がないのが現状である。その理由は、崖海岸の変形速度が海浜変形のそれと比較して一般に遅いことから、海浜変形との関連で考える場合崖は固定境界と見なされることが多いためである。しかし、我が国では福島県および茨城県沿岸に見られるように、固い岩石ではなく、未固結・半固結堆積物で構成される崖も数多く存在し、そのような崖海岸の隣接地域ではしばしば砂浜が連続的に広がっている。未固結・半固結堆積物で構成される崖海岸は、この種の砂浜の形成に大きく関与してきているはずであるから、例えば崖海岸の下手側に位置する砂浜海岸の海浜変形について議論しようとする場合、それぞれを別個に扱うことは問題があると考えられる。その意味で、崖海岸と砂浜の境界部における海浜変形の機構を明らかにすることは、海浜の安定性や形成機構を調べる上で是非とも必要な課題である。そこで、本研究では未固結・半固結堆積物で構成される崖海岸と砂浜の境界部における海浜変形について移動床模型実験により調べ、その変形機構について考察するものである。

2. 実験方法

実験条件の設定においては、現地海岸の状況を調べることが必要とされる。未固結・半固結堆積物で構成される崖海岸と砂浜の境界部の海浜形状の実例として、福島県沿岸に位置する蒲庭海岸と北泉海岸の状況を写真-1, 2に示す。海食崖が突出し、その背後に湾入した砂浜が広がる場合(蒲庭海岸: 写真-1)と、海食崖と砂浜の汀線

がほぼ連続的に延びる場合(北泉海岸: 写真-2)とがある。このように崖海岸と漂砂の下手側の砂浜汀線は、直線の場合とフック状の場合とに分かれる。また、このような崖海岸の沖合には一般に緩勾配の斜面(波食棚)が見られ(宇多ほか, 1990)、汀線を境として勾配が急変するのが常である。一方、波食棚の形成以前の状態を考えれば、少なくとも波食棚上にのっていた陸地部分は波食棚の沖側限界まで続いていたと考えられるから、急勾配の斜面が波食棚の沖側限界まで続いていたと仮定することは現実の条件にかなり近いと思われる。さらに、崖海岸に隣接する砂浜では、海食崖より供給された土砂が絶えず堆積するものの、波の作用により通常の砂浜海岸と同様、かなりなだらかな勾配の海底形状になると考えられる。



写真-1 福島県蒲庭海岸における砂浜の発達 (1992年3月)



写真-2 福島県北泉海岸における砂浜の発達 (1982年10月)

* 正会員 工博 建設省土木研究所河川研究室長 (前海岸研究室長)

** 正会員 建設省土木研究所海岸研究室研究員

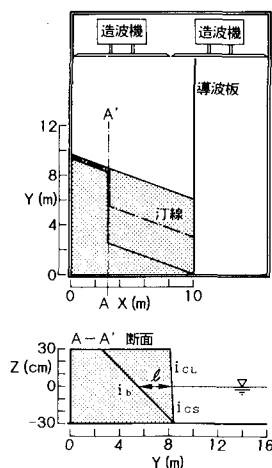


図-1 実験水槽と海浜模型の諸元

以上の点より、模型の条件は図-1に示す形状が考えられる。すなわち、崖部分については直線状汀線からの突出長 l 、陸上部の勾配 i_{CL} 、水面下の勾配 i_{CS} により、また砂浜部分については、海底勾配 i_b により代表される。そこで、模型海浜は l 、 i_{CL} 、 i_{CS} 、 i_b の組み合わせを変え、3ケースの実験条件を設定した。ケース①は、崖が沖に大きく突出する場合 ($l=3$ m)、ケース②は漂砂下手側の汀線が崖の基部の汀線の延長方向に延びる場合、そしてケース③はケース②と同一形状であるが、崖の侵食を防止するために崖の基部に連続的な護岸 (合板製) を設置したものである。波浪条件は $H_0=4.6$ cm、 $T=1.27$ s、 $\theta_0=20^\circ$ に設定し、碎波波向が $\theta_b \approx 10^\circ$ になり沿岸漂砂が卓越する条件とした。実験では崖海岸を沿岸漂砂の上手側に造った。実験砂の底質粒径は $d_{50}=0.28$ mm である。波浪条件との関係から顕著な地形変化の沖側限界を定める水深 (地形変化の限界水深) は 15 cm になる。水位は 30 cm に、そして崖上部の平坦面の高さは水面上 30 cm とした。底質粒径を除いて、これらの諸元をフルード則 (1/50 縮尺) により現地換算すると、 $H_0=2.3$ m、 $T=9.0$ s、地形変化の限界水深が 7.5 m、崖の高さが 15 m となる。

3. 実験結果

(1) 海食崖が突出する場合

波食棚が形成される以前の崖と砂浜からなる場合をモデル化したケース①の初期地形を図-2に示す。崖の突出長 l は 3 m、陸上部と水面下の勾配は一定 ($i_{CL}=i_{CS}=1/0.5$) である。また、崖より漂砂の下手側に位置する砂浜の海底勾配は $i_b=1/10$ である。したがって崖と砂浜の境界部で海底勾配が急変する条件である。

汀線の経時変化を図-3に示す。波の作用により崖部

分では汀線が経時的に後退するが、崖と砂浜の境界に位置する $x=3\sim 5$ m では初期には汀線が著しく前進するものの、2時間目以降ではほとんど変化が見られない。対照的に $x=5\sim 10$ m 区間では汀線が経時的に前進した。沿岸漂砂は崖海岸より下手側へ連続的に流れているにもかかわらず、境界部では2時間目以降汀線変化がほとんど見られないことは、この区間の海浜が動的平衡状態にあることを示している。図-3に示すように、境界部の海岸線の方向は極端に異なり、 y 軸方向からの入射波とのなす角は曲線部の中央では非常に大きくなるので、碎波波高が沿岸方向にほぼ同一の場合には碎波波向が非常に大きく、したがって中央部の沿岸漂砂量も非常に大きくなる。その場合には海浜は急速に変形するはずである。実際にそうはならなかったのは、海岸線の急変部で屈折変形により碎波波高も同時に減少し、沿岸漂砂量で見る限りあまり変化がなかったためと考えられる。

造波後8時間の地形を図-4に示す。崖の沖には侵食緩斜面が形成されており、現地海岸における波食棚が良好に再現されている。また、崖と砂浜との境界 ($x=3$ m) より下手側の区間の $z=0\sim 4$ cm には波のうねり高に応じて堆積平坦面が形成されている。ケース①において形成された崖と砂浜の状況は、写真-1に示した蒲庭海

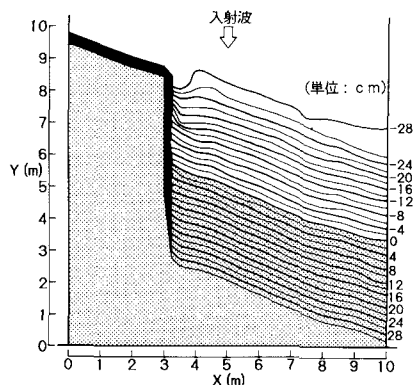


図-2 突出した崖と砂浜からなるケース①の初期地形

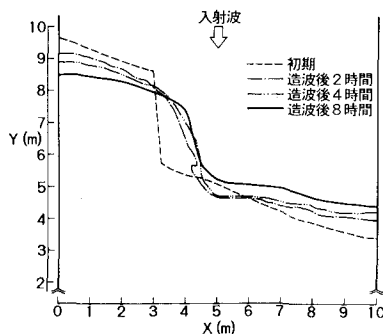


図-3 汀線の変化 (ケース①)

岸や千葉県の屏風ヶ浦とその下手側に広がる九十九里浜(宇多ほか, 1987)の地形的関係とよく対応する。さらに、境界部では大きく湾曲した汀線と、 -24 cm までの等深線はほぼ平行に延びている。このことは、湾曲部で下手方向へ運ばれてきた砂が深海部へ落ち込みつつ堆積したことを表している。

次に、断面形の変化の面より海浜変形について調べてみる。代表測線に沿う断面形を図-5に示す。 $x=0.5$ m 断面では、 $t=0\sim 1$ hr において $z=-3$ cm 以深の沖合に堆砂が見られる。これは崖の初期勾配が $1/0.5$ と急であったため陸上部が大きく崩落し、その砂が堆積したことによる。すなわち、 $t=0\sim 1$ hr における地形変化には沿岸漂砂によるものと、急勾配斜面の安定化に伴う沖向き漂砂によるものとが含まれている。斜面の安定化に伴う沖向き漂砂は初期において著しく、1時間後以降はほとんどなくなるので、 15 cm 以深の沖合では地形変化は生じない。しかし、その後沿岸漂砂による侵食が起こり、ほぼ -15 cm 以浅の海底勾配が次第に緩やかになる。そしてこの状況は、崖海岸沖の波食棚の形成には崩落した土砂を運び去る機構としての沿岸漂砂の存在が重要なことを示している。なぜなら、崩落土砂が十分に運び去られなければ、崖に作用する波浪は次第に減衰し、継続的な

崖の後退は困難となるからである。

境界部の $x=3.25$ m 断面では、造波開始直後には著しい堆積が見られたが、1時間後以降では地形変化は生じなくなった。これはこの断面の位置する $x=3\sim 5$ m の区間において流入・流出土砂量が均衡し、動的平衡状態にあるためである。また、 $x=9.5$ m 断面では漂砂の上手側より運ばれた砂が堆積するために海底勾配が次第に急になりつつ汀線が前進した。

結局、ケース①では崖の沖合の波食棚と、崖線を連ねる線より後退した海岸線を有する砂浜を形成させることができた。そして形成された海浜の状況は現地海岸の例と示した蒲庭海岸(写真-1)や千葉県の屏風ヶ浦と九十九里浜の状況にかなり近いものであることがわかる。

(2) 崖線と砂浜の汀線が直線的に延びる場合

崖の基部を連ねる線と下手側の砂浜の汀線が直線的に延びる場合(ケース②)の初期地形を図-6に示す。このケースは写真-2に示した北泉海岸をモデル化したものである。崖の突出長(l)は 0 m で、陸上部の勾配は $i_{cl}=1/0.5$ 、水面下の勾配は $i_{cs}=1/10$ である。また、崖の下手側に位置する砂浜の海浜勾配はケース①と同様、 $i_b=1/10$ である。したがって、汀線より陸側では崖と砂浜の境界を区切る勾配が著しく異なる条件であるが、海面下では沿岸方向に連続的な海底地形である。

まず、汀線変化を図-7に示す。 $x=0\sim 4$ m の崖区間の汀線は経時的に後退しているが、後退量はケース①と比較するとはるかに小さい。この相違の原因はいくつか考えられる。第1にケース①では崖の沖合の海底勾配が急で、造波開始直後に急激な沖向き漂砂により崖部の汀線が後退したこと、第2にはケース①では崖と砂浜との境界部の海岸線が急変するため相対的に沿岸漂砂量が大きかったと考えられることである。ケース①、②の大きな相違点は、崖と砂浜の境界部($x=3\sim 5$ m)においてケース①では汀線が大きく前進したのに対し、ケース②では

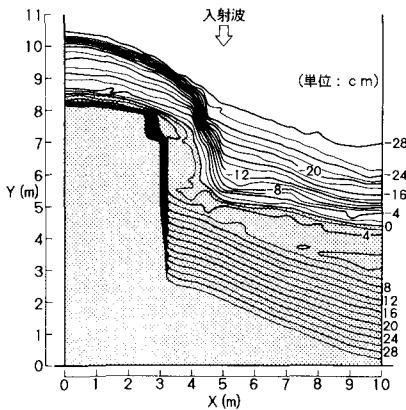


図-4 造波後8時間の地形(ケース①)

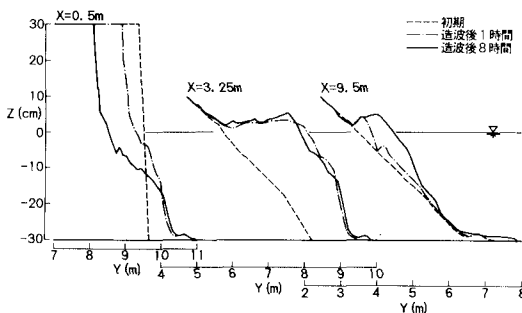


図-5 代表測線に沿う断面変化(ケース①)

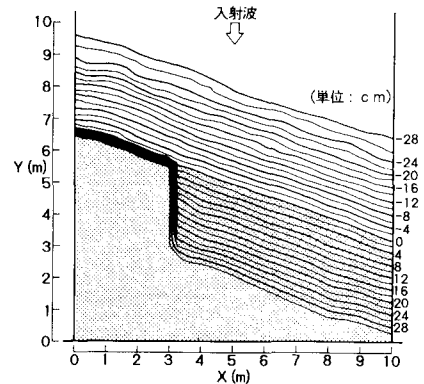


図-6 崖線と砂浜の汀線が直線的に延びるケース②の初期地形

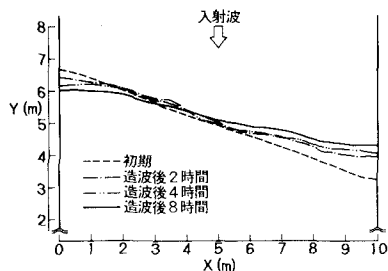


図-7 汀線の変化 (ケース②)

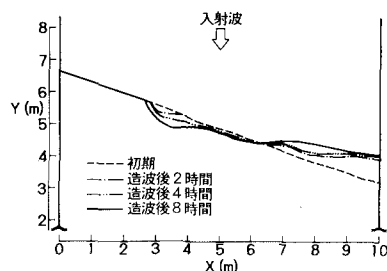


図-8 汀線の変化 (ケース③)

汀線変化はほとんど見られないことである。崖から十分な供給土砂がある場合において、沖合の等深線がほぼ平行なときは崖から見て漂砂の下手側の汀線は直線状の形態を保つ。一方、地形変化の限界水深が浅い等深線が湾曲する場合には湾曲した汀線形となる。このように、崖と砂浜海岸の境界部における汀線の形状は沖合の海底地形に大きく依存する。

ケース②では、崖と砂浜の境界 ($x=3\sim5$ m) においてはケース①とは異なり、著しい地形変化は生じなかった。写真-2 に示した直線状の海岸線を持つ海食崖と砂浜では、崖海岸からの供給土砂量が十分多くあれば沿岸漂砂の連続性が失われることはないで、連続的な海岸線の姿がそのまま保たれることがわかる。

(3) 崖の侵食防止を行った場合

崖海岸において護岸 (合板製) を設置し、侵食防止を図ったケース③の汀線の経時変化を図-8 に示す。護岸設置部分 ($x=0\sim3$ m) では汀線変化は生じないのが当然であるが、そのすぐ下手側では侵食されてフック状の汀線が形成された。初期においては崖と砂浜の汀線が直線的であったのに対し、最終汀線形状は崖海岸部分が突出し、その下手側の汀線がフック状に湾入することとなった。こうした状況は、写真-1 に示した蒲庭海岸とよく似た状態である。

造波後8時間の海浜地形を図-9 に示す。崖 ($x=0\sim3$ m) 前面には $z=-8\sim-16$ cm に侵食平坦面が形成されており、その規模はケース①、②に比較するとはるかに広い。また、 $x=6\sim10$ m 区間には $z=4\sim6$ cm に堆積平坦面が形成されている。崖部分は侵食防止工の設置によりそのまま残されたが、崖と砂浜の境界が著しく侵食された。そして崖が突出し、その下手側が湾入した地形が形成された。

代表測線に沿う断面形を図-10 に示す。侵食域を代表する $x=0.5$ m 断面では $z=0\sim-15$ cm で侵食が生じている。海食崖の後退を許さないためその沖合で侵食が進み、海底地盤が急激に低下した。海食崖の侵食防止を図ったことにより供給土砂が減少したため、地形変化の限界水深まで侵食され切った状態に近づいた。崖海岸と砂

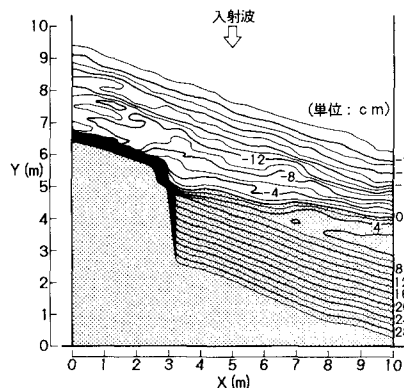


図-9 造波後8時間の地形 (ケース③)

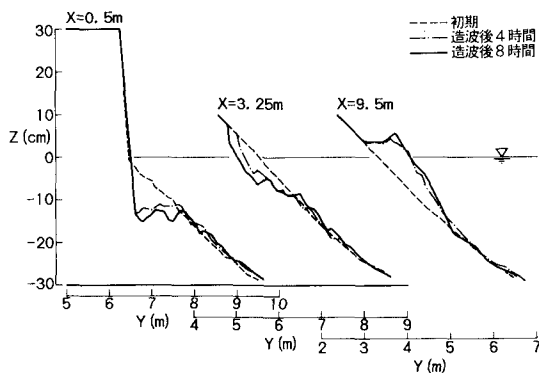


図-10 代表測線に沿う断面変化 (ケース③)

浜との中間に位置する $x=3.25$ m 断面では $z=8\sim-12$ cm で侵食されている。ここでは崖海岸からの供給土砂量が大きく減少したため侵食が生じたことが明らかである。一方、堆積域を代表する $x=9.5$ m 断面では $t=0\sim4$ hrs に堆積が生じたが、その後の地形変化量はわずかであり、ケース②と比較するとこの断面では4時間以降の堆積量が小さい。その第1の理由には崖は後退できず、その沖合が削られるのみであるから、下手側海浜に供給される土砂量自体が少ないことがあげられる。また、崖海岸と砂浜の境界部分自体も侵食されて汀線が後退するとともに $x=6\sim10$ m 区間の汀線が前進するから、これ

らの区間全体の汀線が碎波点における波峰線とほぼ平行になって急速に静的平衡状態になるためである。

結局、写真-2に示すような海岸において、もともと未固結堆積物からなる海食崖の侵食防止を図るために崖基部に護岸や消波工を設置した場合には、それより沿岸漂砂下手側の砂浜との境界部で著しい侵食が生じることを示している。

4. 考 察

未固結・半固結堆積物でできた海食崖で波食が進む場合を考えると、本研究でモデル化したような砂で造られた崖は、生産土砂量が現実と比較して大き過ぎ、モデル化する上で問題が生ずるように思われる。しかし、ケース①、②は確かにこの条件を満足するが、崖からの土砂生産を完全に断ったケース③は、いわばかなり固い堆積岩でできた海食崖に相当し、したがって実際の海食崖周辺での海浜変形はケース②と③の中間、またはいずれか一方に近い形になるはずである。そして海食崖の侵食防止対策を進めることは、ケース②からケース③への変化、すなわち現地海岸ではフック状に湾曲した汀線の形成を加速させることになる。以上の点より、本研究は、実際に起こり得る現象をかなりよくモデル化していると考えられる。さらに、ケース③では崖の沖合では地形変化の限界水深が浅く大きく削られたが、固結の程度によりこの限界水深は異なり、固い場合には沖合はあまり削られないと考えられる。そうした場合、下手方向への供給漂砂量は崖侵食の防止工事に伴って大きく減少し、侵食の影響がより顕著に表われると考えられる。したがって崖と砂浜の境界部の海浜変形を調べる際には、崖の構成物質の質的問題についても十分検討すべきである。

5. 結 論

崖と砂浜の境界部での海浜変形に関する実験の結果は以下に要約される。

① 崖が大きく突出する場合、波の侵食作用により崖の沖合には波食棚が、下手側の直線状海浜との間には海岸線の方向が大きく変わる部分が形成される。ここでは波の入射方向と汀線が大きな角をなすが、上手側からの

漂砂が連続的に供給される限り汀線は動的平衡状態を保つ。

② 崖海岸と砂浜海岸が直線状に延びる場合、崖海岸からの供給土砂量が十分にあれば沿岸漂砂の連続性がくずれることがないので、崖海岸と砂浜の境界においては連続的かつ直線状の汀線が保たれる。

③ 崖海岸で侵食防止が進められると、侵食対策工の沖合の海底面が削られるが、それでは下手側への供給土砂量として十分でないため、崖の下手側の砂浜が侵食される。そしてフック状の海岸線形状が形成される。以上の点は2つの工学的問題を提起する。第1は、海食崖の侵食対策として例えば崖の基部に消波工を連続的に設置しても、その沖合では侵食が進み、海底地盤が下がるため、侵食対策工の効果が次第に減じられる点である。第2は、崖の侵食対策が十分効果を上げた場合、当然の帰結として下手側の砂浜で侵食が激化してしまう点である。このように、崖と砂浜が続く海岸では両者を個々バランスよく安定化すべきことが求められる。

④ 沿岸漂砂により侵食土砂が運び去られる条件では、崖海岸の沖合における波食棚の発達が良好であった。従来、崖海岸の波食棚の形成では土砂は沖向きに運ばれて堆積するのが一般的と言われている。しかし、この条件では崖への作用波高が次第に減少するのに対し、沿岸漂砂によって土砂が運び去られる条件では崖への波の作用がより厳しく、したがって波食棚の形成がより著しくなると考えられる。

参 考 文 献

- 宇多高明・桜本 弘・久保田進 (1987): 千葉県飯岡海岸の海岸侵食について, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 342-346.
- 宇多高明 (1990): わが国の海岸侵食の現状とその問題点, 地理, Vol. 35, No. 6, pp. 34-43.
- 宇多高明・山本幸次・砂村継夫・前原隆生 (1990): 茨城県, 五浦海岸 (岩石海岸) の地形学的特徴について, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 364-368.
- 宇多高明・山本幸次・永瀬恭一 (1992): 貯砂源としての観点から見た河口部海浜の地形的特性, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 391-395.
- 藤井友竝・宇多高明・綿貫布征・鴨下由男・木村慎二 (1988): 相模川河口部の地形変化実態, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 447-451.