

◆特集：砂防・河川・海岸における土砂管理の取り組み◆

砂浜の機能と変形予測

福濱方哉* 山田浩次**

1. はじめに

海岸保全事業として建設される離岸堤、人工リーフ、ヘッドランド等は構造物そのものが波浪を抑えるのではなく、構造物により砂浜幅を回復させ、砂浜の存在により波のうちあげ高や越波量を抑える。近年では景観や環境への影響が小さい「養浜」による砂浜幅回復の取り組みも増えており、1999年の海岸法改正では、構造物だけでなく砂浜そのものも海岸保全施設として指定・管理することが出来るようになった。

しかし本来砂浜を管理するには、高波や土砂供給の減少などに対して砂浜がどこまで海岸保全機能を維持出来るかをきちんと評価・管理出来なければならない。そこで本報文では砂浜変形実験の結果から、波浪条件による砂浜の可逆変化と不可逆変化の特性を明らかにし、条件によってこれ以上侵食が進まない断面形状が存在することも示した。また、それらの変形予測の手法を示した。

2. 砂浜の持つ機能

砂浜は来襲する波を砕波させてエネルギーを減衰させる機能（消波機能）を持っている。同じ沖波が来襲しても、広い砂浜が存在する海岸では波



写真-1 台風で崩壊した堤防

の力が弱まるため、砂浜が侵食・消失した海岸と比べ、波のうちあげ高や、堤防を越波する海水の量は少ない（図-1参照）。

一方で砂浜は、その存在により堤防などの海岸構造物の基礎を安定させる効果がある。基礎部分に十分な土被りがあれば、波圧による転倒・滑動や波浪による土砂吸い出しをある程度防ぐことができる。逆に砂浜が無いと基礎の土被りが減り構造物は波浪の影響を受けやすくなる。

たとえば、写真-1の堤防は2006年の台風による波浪を受け被災したものであるが、砂浜が無く、高波浪があまり弱まらずに堤防を襲ったと考えられる。堤防のコンクリートが崩壊して、それに伴って堤防に沿った道路も崩壊している。

3. 波による砂の移動

砂浜の存在する海岸では当然ながら海中部分にも砂が広がっており、海底は砂で形成されている。

波の動きと海底の砂の動きの関係を海中で観察すると、押し波・引き波に合わせて砂が動いている。これは波により海中の水粒子も動き、海底の砂が摩擦を受けるためである。しかし水深が深くなると、海底の砂が受ける摩擦は小さくなる。

波による水の粒子の軌道運動は、深海では円を、

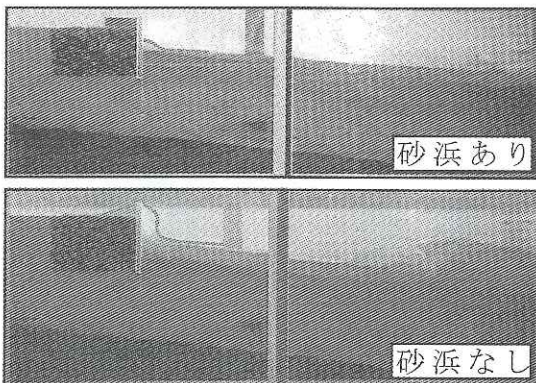


図-1 砂浜の消波機能

岸に近いほど水粒子の運動は大きく、砂の移動は活発である

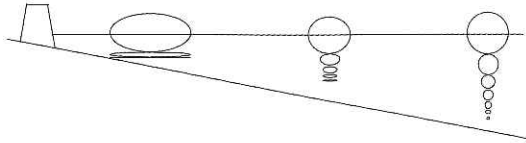


図-2 波による水粒子の運動

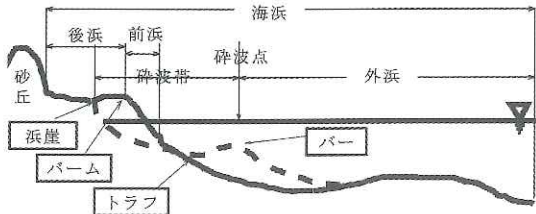


図-3 海浜地形

浅い海では楕円を描くが、沖側の深い箇所では、波浪は海底まで影響をおよぼさず、波浪による砂の移動はある水深より浅い部分だけに限られる(図-2)。その境界の水深は、波の力で砂が動く限界の水深という意味で「移動限界水深」と呼ばれている。

4. 海浜地形とその変動

海岸工学において「海浜」と呼ばれるのは、暴風時の波の作用が海底に及ぶ海側の限界から、この波が到達する陸側の限界までの領域をいう。海浜の代表的な地形と区分は図-3のようである¹⁾。

海浜に來襲する波浪は静穏時と荒天時では大きく違う。海浜地形の海側は、砕波点より沖側の外浜と、砕波点より陸側と陸域の遡上帯を含めた砕波帯に区分されることが多い。波浪特性により砕波点は変化するので、あくまで概略の区分である。

陸側のうち「前浜」と呼ばれるのは、静穏・低潮時の波浪の遡上開始地点から、静穏・高潮時の遡上波が到達する範囲までの領域である。一方「後浜」と呼ばれるのは、前浜の陸側境界から荒天・高潮時に波浪の到達する範囲までの領域である。

静穏時には遡上波により砂が岸へうちあげられ、「バーム」と呼ばれる沿岸方向に伸びる微高地が形成されるが、荒天時にはそれが波浪に削られ「浜崖」が出来る。水中の砕波点周辺に浅瀬(「バー」)が出来るとともに、バーの岸側に深み(「トラフ」)が出来る(図-3の点線の地形)。一般に、暴浪波を受けると前浜付近の砂は沖側に動き堆積する。また暴浪波が止み静穏な波が続くと、砂は再び前

浜付近に戻ってくることも知られている。

波打ち際周辺を除けば、我々は海中の地形を直接目にすることができない。暴浪波が來襲した際の海底地形の変化、また暴浪波が収まった後の海底地形の変化を把握するため、国総研の所有する波浪実験水路で以下のような実験を行った²⁾。

水路に一樣勾配の斜面を作り、その上を中央粒径 $d_{50} = 0.33\text{mm}$ の砂で覆い、水を満たす。Z = 0.0m が水面で、水面が砂面と交わるところが汀線である。汀線から60m沖の水深は3mであり、海底勾配が1:20の海浜となる。

この実験模型に、造波機で作った波を連続して作用させる。波の条件は一般に波高(波の大きさ)と周期によって規定されるが、本実験では、図-4のように経時変化する波を作用させる。

すなわち、①最初の12.9hは静穏(波高0.13m、周期2.5秒)な波、②次の5.4h(累加18.3h)に暴浪波A(波高0.31m、周期2.5秒)、③次の12.9h(累加31.2h)は静穏な波、④次の3.2h(累加34.4h)は波高がより高く周期も長い暴浪波B(波高0.44m、周期3.0秒)、⑤次の12.9hは静穏な波を与える。

波浪の作用にとまなう海底地形の変化を図-5に示す。①静穏波を作用させると、汀線より陸側に砂がうちあげられバームが形成される(12.9h)。この状態に②暴浪波Aを作用させると、海底にトラフとバーが形成されることがわかる(18.3h)。③その後、静穏波を作用させるとバーがほぼ消滅しトラフが埋め戻され、静穏時のもとの海底地形(ここでは①の地形)に戻るような可逆的な地形変化を生じていることがわかる(31.2h)。砂浜は、來襲する波のエネルギーを弱めるとともに姿を変え、さらに自律的に元の姿に回復することが確認された。

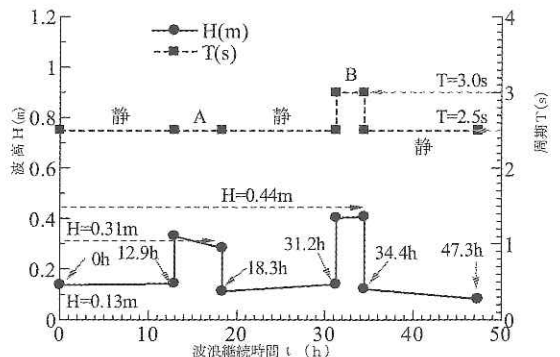


図-4 波浪条件

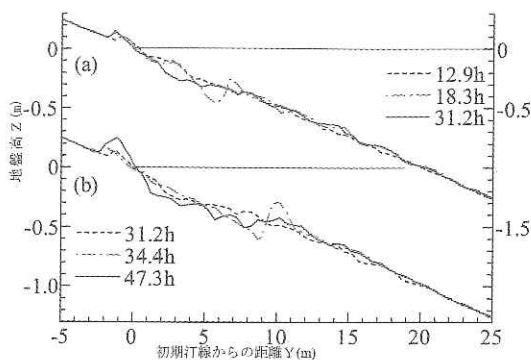


図-5 海底地形の変化

次に、④波高がより高く周期も長い暴浪波Bが作用すると、再度トラフとバーが形成される(34.4h)。このトラフとバーは暴浪波Aを受けた②の状態よりさらに深い位置に形成され、規模が大きい。この状態でさらに⑤静穏な波を作用させると、沖に移動していた砂が岸にうちあげられバームが発達し、汀線が前進するが、深い位置のトラフとバーは移動限界水深で深にあるため完全にはもとに戻らない不可逆的な現象が見られる(47.3h)²⁾。

5. 砂浜の回復・再生

砂浜が、波のエネルギーを減衰させた結果、前項のような不可逆的な変形が起こり砂浜の砂が移動限界水深で深に移動して戻らない場合、砕波水深で深にある砂は波を砕波させて減衰させることが出来ないため、砂浜の機能が低下し高波浪に対して安全性が保たれなくなる恐れがある。海岸における波のうちあげ高や越波量を減少させるため、何らかの消波機能をもつ海岸保全施設を整備する必要がある。

これまで、海浜における消波機能を維持する観点から、コンクリートブロック製の消波堤や離岸堤が建設されてきた。しかしながら、景観や海浜利用の観点から砂浜に巨大なコンクリートブロックはふさわしくなく、できるだけ消波堤や離岸堤の採用は控えたい。

海浜の消波機能の回復にあたっては、砂浜の自然な回復・再生による消波機能の回復の観点から、「養浜」が推奨される。養浜は材料が砂礫であるため、景観、海浜利用の面から、コンクリートなどの材料よりはるかに有利である。

しかしながら、養浜は、ただ砂礫を海浜に投入すれば効果があるというのではなく、砂の量に加

え、粒径など質の議論が重要であることがわかってきている。

6. 汀線の後退限界

波浪の作用が続くと、バームが発達することを先に述べたが、同じ波が無限に継続して作用したら、海浜はどのように変形するであろうか。ある条件のもとでは、波がいくら作用してもこれ以上侵食されない限界、すなわち「平衡海浜形状」があることがわかってきている。海浜の平衡形状は、波の条件と海浜の粒径分布によって決まると考えられている。

改めて、波浪と粒径の条件を変えて実験を行ってみる。

中礫からシルトまで幅広い粒度分布を持つ材料で構成された中央粒径0.62mmの混合粒径砂で表面を覆い、初期海底勾配1:20とし、波高0.6m、周期3.5秒の規則波を地形が変わらなくなるまで作用させ続ける。78h経過した様子が図-6である。実線が地形の形状、丸付き線が中央粒径である。この状態に至るとこれ以上同じ波を作用させても地形は変化しない。

地形の形状を見てみると、水深1.3m付近に侵食平坦面が形成されると同時に、その陸側では前浜の勾配が1:6程度と急になった。この形状から、1.3mが移動限界水深であることがわかる。

また、平坦面上は細粒砂で覆われているのに対し、前浜には粗粒砂が集中的に堆積した。波の作用により混合粒径砂が分級し、粗粒砂は高さ0.5mのバームを形成して岸側に急勾配をなし、細粒砂は沖合へと運ばれ緩勾配で堆積することがわかる。

また、侵食された領域に含まれていた粗粒砂が汀線付近に移動してバームを形成することから、

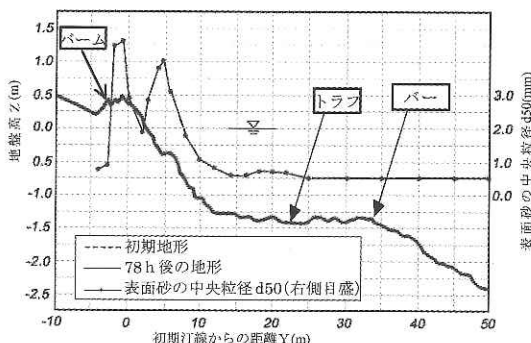


図-6 平衡海浜形状

バームの発達には侵食領域に含まれる粗粒砂の量に依存することがわかる。バームの高さは波のうち上がり高さに依存するが、バームの発達のためには粗粒砂が必要である。沖合の限界水深以深には、細粒砂が運ばれ、1:10程度の初期勾配より急な勾配で堆積が進んだ。

バームが十分発達した後では、前浜勾配は粒径の安定勾配と一致し安定化する。移動限界水深付近の平坦面もそれ以上移動しないので安定となり、限界水深以深への砂の流出が止まる。よってバームが十分発達した場合のみ波浪に対する平衡海浜になる³⁾。

この海浜形状は、波浪により侵食しきった海岸の形状であるが、このような最終的な平衡海浜形状は、個々の砂浜の有する粒径分布に依存することがわかっている。

たとえば、細かい砂ばかりで構成される海浜では、バームが発達できないため、前浜が細粒分に対応した安息角に至るまで侵食が止まらない。また養浜に際して、細かい粒径の砂ばかりからなる材料を選択すると、その砂は限界水深以深に移動し、汀線における砂浜の回復に寄与しない。

7. シミュレーション予測

安定海浜形状の予測は、汀線の前進・後退を予測するなど海岸管理・設計上重要な事項である。そのため、この平衡海浜形状を精度よく予測する手法が重要となる。われわれは、粒径を考慮した等深線モデルを提案し、上記の実験と同じ条件での海浜形状の再現計算を行った⁴⁾。実験より計算の方が平衡状態に達するのに多くの時間がかかったが、平衡状態での比較を行うこととした200h後

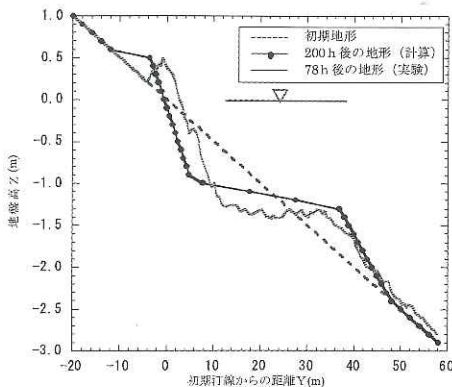


図-7 数値実験による再現計算

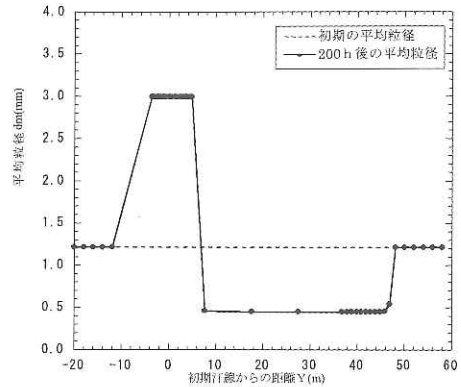


図-8 平均粒径の岸沖分布の計算結果

の計算結果を図-7に示すが、地形の特性がよく予測されたことがわかる。また、図-8に平均粒径の岸沖分布の計算結果を示すが、汀線付近に粗粒分が集中的に堆積し、沖合の緩勾配箇所にも細粒分が堆積するという図-7の実験結果の特性を再現した。今回は2粒径の混合で計算を行ったが、今後は実際の海岸に近い粒径分布を用いてより精度を高めた計算を行う予定である。

これらの知見から海浜地形を事前に予測することもほぼ可能である。このような知見を踏まえ、良好な海岸環境の創造に努めていきたい。

参考文献

- 1) 砂村継夫：海岸地形、土木学会海岸工学委員会編「海岸施設設計便覧」、土木学会、pp119-124、2000
- 2) 山本幸次、鳥居謙一：海浜縦断面の可逆・非可逆的な変化過程に関する実験的研究、海岸工学論文集、第52巻、pp491-495、2005
- 3) 日黒嗣樹、山本幸次、福濱方哉：平衡海浜の形成過程と養浜材の粒径に関する研究、海岸工学論文集、第52巻、pp501-505、2005
- 4) 福濱方哉、山本幸次、宇多高明、芹沢真澄、石川仁憲：混合粒径砂を用いた大型水路実験による縦断形変化の再現と予測、海岸工学論文集、第53巻、pp446-450、2006

福濱方哉*



国土交通省国土技術政策
総合研究所河川研究部海
岸研究室長、工修
Masaya FUKUHAMA

山田浩次**



国土交通省国土技術政策
総合研究所河川研究部海
岸研究室主任研究官、工
修
Koji YAMADA