

大規模海岸構造物による海岸侵食の機構

土屋義人*・山下隆男**・都丸徳治***

1. 緒 言

砂浜海岸には、しばしば港湾など大規模な海岸構造物が建設されるが、多くの場合自然との不調和を余儀なくし、漂砂系を乱して思わぬ海岸侵食を起こしている。わが国にもこのような実例が少なくないが、それらのほとんどは多かれ少なかれ事前に、その周辺海岸への影響調査を実施してきているのである。このことは、大規模な海岸構造物が砂浜海岸に建設された場合の海浜変形、とくに海岸侵食の機構があまり明確にされていないためと思われる。従来、数多くの事例が報告され、またその侵食機構の解明が試みられてきたが、一般的に論じられたものはきわめて少ない（土屋ら, 1988, 宇多・野口, 1990）。

本研究では、最近沿岸域の開発に伴って、この種の海岸侵食の解明とその制御法の開発が大きな社会的要請となってきたので、その侵食機構を侵食要因によるそれぞれの機構として考え、実際にはそれらの侵食現象が相互に作用しあういわゆる協同現象としての侵食の助長機構が存在するものとして、少し一般的に考察することにする。

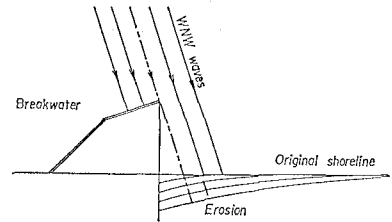
2. 海岸侵食の機構

多くの場合、砂浜海岸には沿岸漂砂が存在するが、とくにわが国の海岸では異なる方向への沿岸漂砂が存在し、その結果ある方向に年平均的な沿岸漂砂量が存在する場合が多い。いずれにせよ、砂浜海岸に大規模な海岸構造物を建設すると、その漂砂系を乱すことになるので、まずその場合の侵食要因を考察し、それによる侵食機構を考えよう。

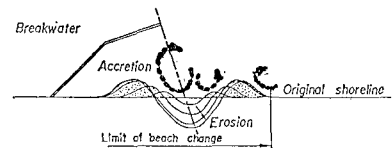
(1) 侵食の主要因

まず、図-1に示すように、対象とする海岸には卓越波浪があり、それによる沿岸漂砂が存在する場合を対象とするか、卓越波浪が異なる2方向から来襲する場合についても海岸侵食の機構を考察する。

海岸に大規模な海岸構造物が建設されると、1) 沿岸



(a) 侵食原因 1) の場合



(b) 侵食原因 2) の場合

図-1 海岸侵食の2つの機構とその特性

漂砂が阻止され、漂砂の不連続性により、2) 防波堤のような大規模の構造物による波浪の変形とそれに伴う海浜流の形成により海岸侵食が起こり、3) 侵食対策として建設された堤防、護岸などの前面の砂浜が消失すると、反射波の発生により、海岸侵食は助長されることはよく知られている。

(2) 海岸侵食の機構(1)

このような海岸侵食は図-1に示したように、2つの主要因ごとにそれらの侵食機構を分けて考えられる。すなわち、侵食原因1) 沿岸漂砂の阻止による海岸侵食は沿岸漂砂が存在しなくなった地点より、漂砂の下手側の方向に侵食され、その侵食波は下手側に海浜変形の境界条件がなければ無限に進行し、図-1(a)に示すようにしだいに広範囲に拡大していく。もし、下手側に海浜変形の境界条件に相当するものがあって、たとえばそこで再び沿岸漂砂が阻止される場合には、その区間である終局的な海浜を形成することになる。

これに対して、侵食原因2) 波浪の変形による海浜流の形成による海岸侵食では、一般に海岸構造物による波の回折により、図-1(b)に示したように2つまたは3つの顕著な海浜流の循環流が現われる。もし、この循環流の形成による漂砂が海浜変形の主体をなすならば、図

* 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

** 正会員 工修 京都大学助手 防災研究所

*** 正会員 工修 茨城県土木部長

に示したように、海浜変形が起こり、それは入射波の特性、構造物の規模などに依存するが、一般にある限定された領域に限られることに注目すべきである。しかし、海岸侵食に伴って海がけが侵食され、多量の細粒の土砂が漂砂に加わるような場合には、発生した循環流によって港内に堆積したり、また沖方向に流失、堆積することになるであろう。

さらに、大規模な海岸構造物の建物に伴って、潮流特性が変化する場合や恒常的な吹走流が存在し、それが構造物の存在によって変化するような場合で、前述したように細粒の土砂供給があると、予想外の堆積傾向を表すことがみられるであろう。とくに、波浪の来襲方向と異なる方向からの強風による吹走流が存在する場合には、構造物の存在によってその流況は大きく変化することが予想されるので、その流れに支配されるような漂砂が存在するようになると、予想外の海底地形の変化を示すことになる。

(3) 海岸侵食の機構(2)

前述した場合は、主として1つの卓越波浪による海岸侵食を対象としたが、わが国の多くの海岸では卓越波浪が異なる2方向から来襲するので、その場合の海岸侵食の機構を考察する。説明の都合上、卓越波浪をそれぞれNW, NNE とし、これらの沿岸漂砂への寄与は前者の方が大きく、たとえば0.6および0.4のように考え、その事象の発生は当然ランダムとする。まず、図-1に示すように、説明の都合上、構造物の左側(NW波の来襲する方向)と右側(NNE波の来襲する方向)とに分けて考える。

a) 構造物の右側の侵食機構 NW波による海浜変形は図-1に示したとおりであり、沿岸漂砂量 Q_W の存在により、侵食原因1)および2)が同時生じ重じゅうすることになり、海浜変形を模式的に画けば図-2に

点線、実線で示したように進行する。そこには2つの侵食機構において、波による沿岸漂砂としての輸送過程に、侵食原因2)による海浜漂流の発生が伴って両者の協同現象として海岸侵食が進むものと理解される。これに対して、NNE波によっては沿岸漂砂量 Q_E が存在するが、侵食原因2)による海浜変形は起らず、図に示したように沿岸漂砂の堆積としての海浜変形が起こることになり、これら2つの海浜変形がランダムに生じ重じゅうすることになる。その結果、このような海岸では構造物による遮へい域、すなわち港内にしだいに漂砂が侵入し、堆積する傾向を示し、その傾向はこのように2つの異なる方向からの卓越波浪がある海岸において著しいことになる。そして、海岸侵食は沿岸漂砂の卓越する方向に拡大し、侵食波はその方向に伝播していくことになる。

b) 構造物の左側の侵食機構 NW波による場合は沿岸漂砂量 Q_W によって、一然には図-2に点線、実線で示したように堆積するが、もし波浪が構造物の法線に対してN方向により傾いて入射すると、発生した反射波は入射波と逆向きに沿岸漂砂をもたらす、かえって侵食される場合も起こるであろう。一方、NNE波による場合は、図に示したように、侵食されることになり、構造物の法線に対して若干波向が変わっても、この傾向は変わらないであろう。これら2つの異なる方向からの沿岸漂砂の存在による海浜変形は、その大小関係によって侵食または堆積傾向を示すことになるはずである。いうまでもなく、いずれの場合にも、沿岸漂砂の不連続性によって起こる海浜変形であるが、海浜変形の境界条件に対して沿岸漂砂の向きが異なるところに特徴がある。

3. 数値モデルによる侵食機構の検討

以上述べた海岸侵食の機構を数値モデルによってさらに理解するための計算を若干実施したので、その概要を説明する。ただし、ここで用いたものは、1) 1ライン汀線変化予測モデル、2) 海浜流モデル、および3) 3D海浜変形予測モデル(山下ら, 1990)であるが、それらの詳細については省略する。

(1) 沿岸漂砂の阻止による海岸侵食

おおよそ日本海における波浪条件で、図-3に示すようなモデル海浜を考える。ただし、海岸構造物としてはプログラムへの入力の上、図のようにし、図中の諸元は計算条件として与えることにする。まず、海底勾配として $1/100$ 、波向 $\theta=10^\circ$ で周期 $T=8s$ 、波高 $H=2m$ の場合で、構造物の設置位置で沿岸漂砂量 $Q_W=0$ とした場合、すなわち侵食原因1)による汀線変化を図-4に示す。ただし、時間ステップは連続的に波が作用するとして10日間とし、100日後まで示してある。これに対して、図-3において構造物を離岸距離 $b=400m$

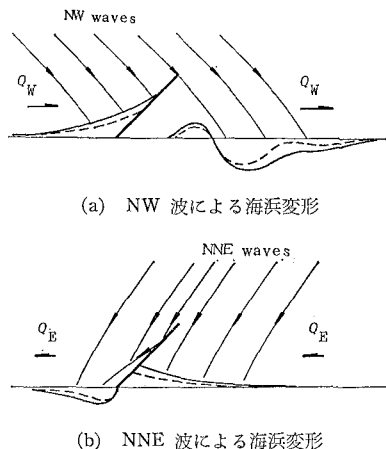


図-2 卓越波浪が異なる2方向からの場合の海岸侵食の機構

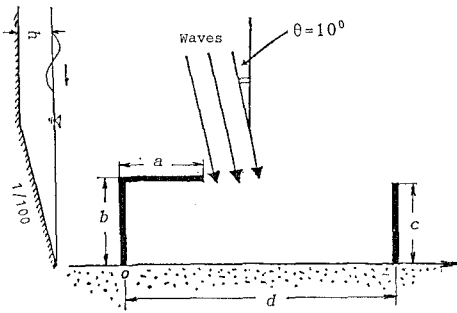


図-3 数値計算におけるモデル海浜と諸元

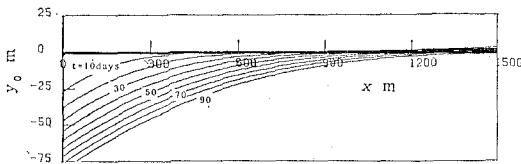


図-4 侵食原因 1) の場合の汀線変化 (1)

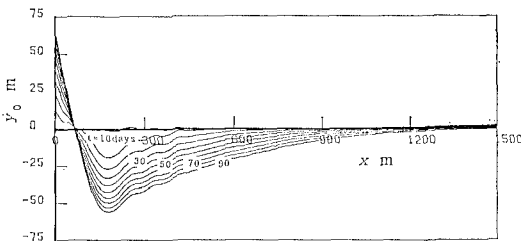
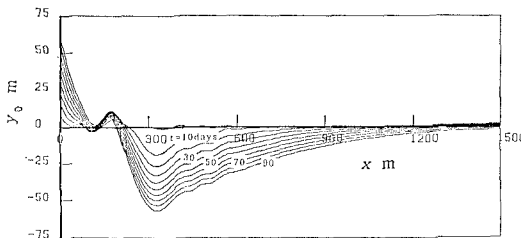
(a) $a=150$ m の場合(b) $a=300$ m の場合

図-5 侵食原因 1) の場合の汀線変化 (2)

とし、 $a=150, 300$ m のそれぞれの場合について構造物による波の回折効果を考慮すると、汀線変化は図-5のようになる。これらの計算結果から、この場合の海岸侵食の特性として、次のことが特記される。

(1) いずれの場合も、汀線変化は構造物の近傍、とくに波の屈折、回折領域の境界付近を中心として侵食され、汀線は著しく後退し、それは時空間に無限に拡大する傾向を示す。

(2) 侵食原因1) の場合でも、構造物による波の回折効果はエネルギーフラックスの変化となって1ライン汀線変化予測モデルに導入されているので、構造物によ

る回折効果が汀線変化として現れる。すなわち、 $a=b=0$ で、かつ $Q_w=0$ の場合が図-4であり、 $b=400$ mで、 $a=150, 300$ mとして波の回折効果を増大させるに従い、汀線変化がどのように変わるかを示したものが図-5ということになる。ここで、注目すべきことは、 a が小さく回折領域が小さい場合には回折波の作用で漂砂が構造物の基部まで運ばれ、そこに堆積するが、 a が長くなって回折領域が広がると、堆積領域にさらに小さな舌状砂州のような堆積が現れることであり、さらに構造物基部の堆積は底質が粗くて回折波で輸送されない場合には顕在化しないようになるであろう。

(3) 図-5 に示した (a), (b) をさらに比較すると、最も汀線が後退する位置は波向との関係で構造物の沿岸方向への投影距離に関係し、それより漂砂の下手側における汀線変化は構造物の規模にはほとんど関係せず、侵食波ははだいに時間発展することがわかる。

次に、図-3 において、構造物から下手側の $d=2000$ m の位置に海浜変形の境界条件 (この場合は $Q_w=0$) となるような実堤 (ただし、 $b=c$) を設置した場合について、その汀線変化を計算した結果を図-6に示す。ただし、この場合は波高 $H=4$ m とし、そのほかの条件は前述した場合と同じである。明らかに、この場合には1) 最大の汀線後退は波高が大きいかにもかかわらず小さく、汀線の時間的変化においてある終局的な状態いわゆる安定海浜への移行が可能である。これは大規模な海岸構造物による侵食制御として、漂砂の下手側に海浜変形を支配できる突堤などの構造物を設置することにより、安定海浜を形成させて海浜を安定化できることを示すものと理解させる。そして、2) ここに終局的に形成されるのは静的に安定な海浜であり、その形状は構造物の基部付近を除いて構造物先端の沿岸方向の長さ a にはほとんどよらないようである。

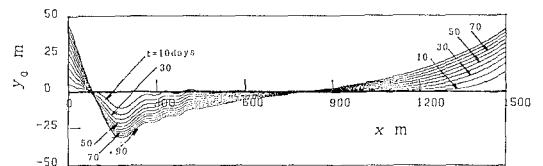
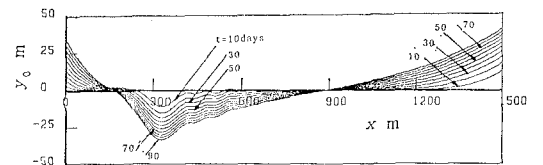
(a) $a=150$ m の場合(b) $a=300$ m の場合

図-6 侵食原因 1) の場合で、漂砂の下手側に突堤を設けた場合の汀線変化

(2) 波浪・海浜流の変化による海岸侵食

大規模海岸構造物として、防波堤が建設された場合、その周辺海域における波浪、海浜流、および海浜変形をそれらの数値モデルによって計算し、前述した侵食原因(2)による海岸侵食の機構を理解したいのである。それを系統的に調べるためには少なくとも、1) 卓越波浪を対象とする場合、2) 吹走流の発生を対象とする場合、および卓越波浪が2つの異なる方向から襲撃する場合などに対して、波浪、海浜流のみならず、海浜変形とくに海底地形の変化まで予測しなければならない。山下ら(1990)が最近開発してきた3D海浜変形予測モデルは、波浪、海浜流との協同現象としての漂砂、海浜変形を対象としたもので、各種の数値計算において試行してきたものであるが、ここでは紙数の都合上、これらのうち波浪の変形とそれに伴う海浜流の予測から、海浜変形とくに海岸侵食の機構を考察することにする。数値計算の対象は図-3に示すような海域で、 $h=8\text{m}$ 、 $a=2\text{km}$ 、 $b=2\text{km}$ 、 $c=0$ で、波浪条件としては周期 $T=7\text{s}$ 、および波高 $H=4\text{m}$ で直角入射 $\theta=0$ の場合である。

まず、図-7にはこのときの波浪の変形を計算したもので、碎波によるエネルギー減衰を考慮した双曲形緩勾配方程式を任意反射境界、完全反射境界(Sponge layer)に対して数値計算したものである。これに対する海浜流の計算結果を図-8に示す。明らかに、3つまたは4つの循環海浜流が発生するので、もしこれによって底質が漂砂となって輸送されると、岸に向う相対する1組の循環のところでは著しい侵食が起り、それが港内に運ばれて堆積することになり、また相補する1組の沖向きの循環によっては堆積が生ずることになるわけである。このことはすでに図-1(b)に示した侵食機構のよい説明となるものである。もし、この循環海浜流によって細粒の土砂が輸送される場合には、確かに港内に堆積する傾向を示すであろうし、また相補的な沖向きの海浜流によると沖側に細粒の漂砂が輸送され堆積されることになる。

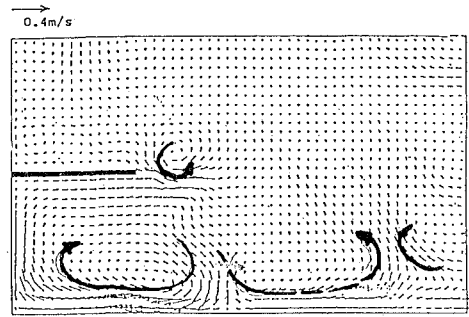


図-8 防波堤の周辺海域における海浜流 (1)

このような機構による海浜変形を制御するためには、発生したこれらの循環海浜流を消滅させなければならない。すなわち、具体的な方法としては最も大きい循環を制御するためには図-9および10に示すように、ある長さの突堤を設ければよく、その最適な位置を選定する必要がある。図-10に示したように、ただ1つの突堤を設置することで、発生した顕著な循環をほとんど完全に消滅させ制御することができる。このときの波浪の変形は図-9に示したとおりである。事実、この方法は港湾の埋没防止に対して実際に用いられているが、このこ

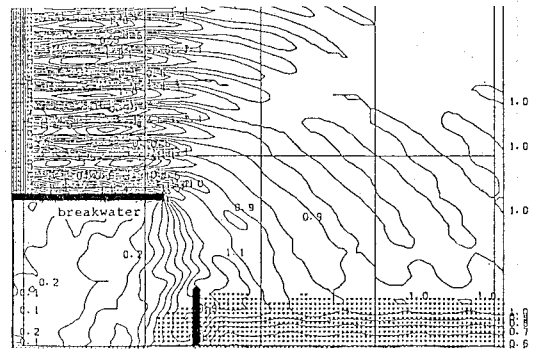
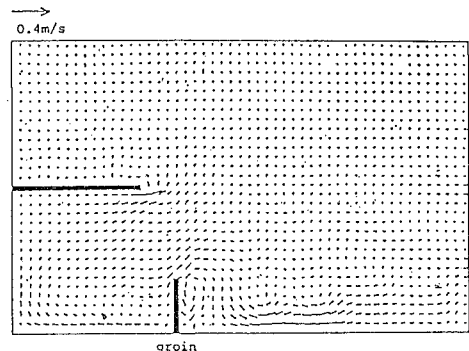
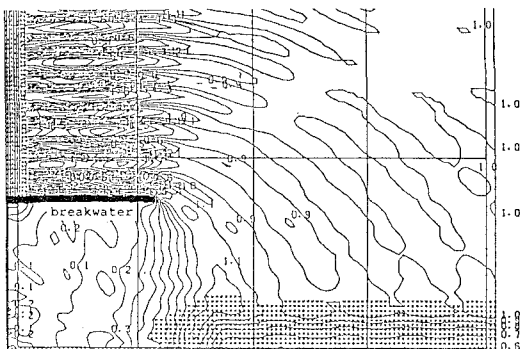
図-9 防波堤の周辺海域における波浪の変形 (2)
(突堤のある場合)図-10 防波堤の周辺海域における海浜流 (2)
(突堤のある場合)

図-7 防波堤の周辺海域における波浪の変形 (1)

とは逆に防波堤を砂浜海岸に延長すると、前述したような機構で港内に漂砂が侵入してくることを理解させるものである。

4. 現地海岸への適用

直江津、大潟海岸は前述したように卓越波浪が異なる2つの方向から来襲する海岸の代表ともいえよう。ここでは、よく知られているように、防波堤の延長に伴って著しい海岸侵食が起り、20年ほど前に存在した美しい砂浜はいまは山積するコンクリートブロックの海岸に変わってしまっている。関川を主たる漂砂源とするこの海岸の汀線変化を 図-11 に示す。

この間における汀線変化は図中に示した3つの期間、すなわち 1) 1930から1947年、2) 1947から1966年、および 3) 1971から1980年についてである。これは航空写真などの存在により、このような期間別となったが、それぞれの期間における防波堤の長さ L を示してある。まず、1) の期間では防波堤はほとんど伸びておらず、関川からの漂砂源が存在しておったわけで、汀線は空間的に変動するが、全体的には前進傾向であったことがわ

かる。2) の期間では、防波堤の延長は 1km 程度で、ちょうど 図-5(a) のような状況に近く、図-11 に示した汀線変化もそのような傾向を示していると理解される。しかし、3) の期間になると、海岸侵食は関川から東海岸(右側)に向かって著しく進み汀線後退の範囲が大きく拡大したことがわかる。同時に、港内への堆砂も進んだことがわかるが、これは多分前述した 図-2 に基づく海浜変形の機構から2つの侵食現象の協同現象によるものと理解されよう。

5. 結 語

以上、大規模海岸構造物が砂浜海岸に建設された場合の海岸侵食の機構を考察し、そこには基本的に2つの主要な侵食原因による侵食機構が存在すること、および卓越波浪が異なる2つの方向から来襲する場合の侵食機構を示し、港内への堆砂を説明した。ついで、汀線変化、海浜流などの予測モデルによる数値計算の結果から、前述した侵食機構の理解につとめるとともに、直江津港の造築に伴う汀線変化がここで論じた侵食機構でよく説明できることを述べた。

なお、このような場合の海岸侵食の過程をそのまま放置しておいたとき、どのような海岸地形が形成されるかについては、次報で報告することにした。

本研究は文部省科学研究費試験研究(代表者: 土屋義人, No. 01850121) による研究の一部であること、および 図-11 の作成には建設省高田工事々務所の整理した資料を借用したことを明記する。

参 考 文 献

- 宇多高明・野口賢二 (1990): 大潟海岸の侵食機構に関する一考察, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 474-478.
- 山下隆男・土屋義人・松山昌史・鈴木 鋼 (1990): 海浜変形数値モデル, 京大防災研年報, 第33号, pp. 503-542.
- 土屋義人・河田恵昭・山下隆男 (1988): 大潟海岸侵食防止対策模型実験, (財) 防災研究協会, pp. 98-115.

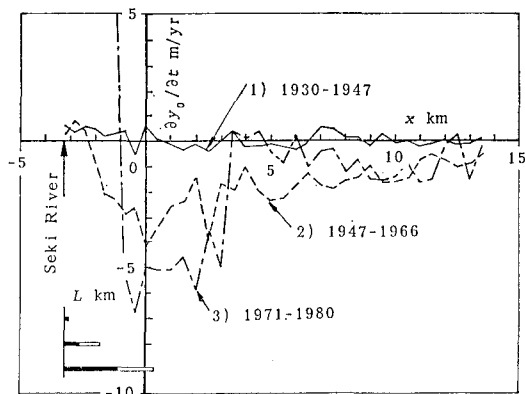


図-11 直江津港の防波堤の延長に伴う汀線変化 (表示期間についての平均として評価)