

海岸構造物による海岸侵食とその制御 (1)

——海岸侵食の機構——

土屋 義人・山下 隆男・都丸 徳治*

BEACH EROSION BY COASTAL STRUCTURE AND ITS CONTROL (1)

——MECHANISM OF BEACH EROSION——

By *Yoshito* TSUCHIYA, *Takao* YAMASHITA and *Tokuji* TOMARU*

Synopsis

In the first report, the main causes for beach erosion by large a coastal structure are first classified into 1) interruption of longshore sediment transport by the structure and 2) beach change due to the formation of nearshore currents by deformation of incident wave by the structure, and 3) additionally change in beach profile due to waves reflected by sea dikes and walls when the sandy shore in front of the sea dikes and walls has reduced. Secondly, the mechanism of beach erosion due to the erosion causes mentioned is explained both in the cases of single predominant wave and two predominant waves respectively. Thirdly numerical examples of shoreline change by a structure are shown. It is demonstrated that, when a couple of the suitable boundary conditions for shoreline change due to the first erosion cause are given, the shoreline change tends to an equilibrium state that shows a formation process of stable sandy beach downstream the structure. An example of numerical simulation results of nearshore currents behind an offshore structure is also presented to show a nearshore circulation pattern that may cause beach erosion by the second erosion cause. It is concluded from numerical simulation that when a small groin is constructed at a special position the beach change can be well controlled. Forthly a practical example of such beach erosion problems is shown in the case of Naoetsu Harbour to demonstrate the mechanism of beach erosion proposed.

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、土屋、河田、山下¹⁾および宇多、野口²⁾によるほか、一般的に論じられたものはきわめて少ない。

いうまでもなく、多くの砂浜海岸は最終後氷期以降の海進にともなって、海水面が安定してきた時代から、背後地からの土砂生産と波浪を始めとする海からの作用との関係で形成されてきたものと考えられる

* 建設省土木研究所次長

が、一般にはほとんど平衡状態になっているものと思われる。そこに、われわれ人類の活動として種々の海岸構造物が建設されたり、また漂砂源としての背後地、河川流域などが開発されると、それらの影響が必ず現われることになり、海浜変形、海岸侵食として顕在化してくるのである。したがって、その過程を究明し、適切な海岸保全を思考するには、少なくとも対象とする海岸全域の動態を十分理解し、把握しておく必要がある。すなわち、砂浜海岸にはそれが存在してきた根拠となる自然条件が必ず存在し、それによって現在の砂浜が形成されているはずである。海岸侵食を制御し、海岸の安定化を図るためには、この事実を十分理解することが要求される。言い換えれば、考察すべき時空間スケールを十分長くかつ広くとって、その過程を包含するような、いわゆる大規模海浜過程 (Large Scale Coastal Behavior) を究明して、そのなかで果たしてどうすれば海岸侵食を制御し、安定化させることができるかを研究しなければならない。このような方法論でこそ、初めて可能な海岸保全を思考することができると思われる。

本研究は、その構成上、3編に分けて印刷されるが、その主たる考え方は前述したように、対象とする海岸のいわゆる大規模海浜過程を究明したうえで、そこで本当に可能な海浜の安定化をどうすればよいかという方法論に基づくものであり、その具体的な対象を延長約 25 km に及ぶ上越・大潟海岸における海浜過程とその侵食制御においたものであるが、それぞれの概要は次のようである。まず、第1報では、主要な海岸侵食要因を明確にした後、そのような海岸侵食の機構をそれぞれ要因による侵食機構として考え、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、一般的に考察することにする。ついで、第2報では、具体的に上越、大潟海岸の大規模海浜過程を模擬できる長期汀線変化予測モデルを構築して、直江津港の築港以前の海浜過程を追算した後、この海岸を安定化させるための方法論を数値実験で究明する。第3報では、これらに基づいてこの海岸侵食を制御し、安定化させるために、安定海浜工法に基づく具体的な方法論を提示し、その実現に向けての水理実験の結果から、安定海浜の形成を確認するとともに、実施工上の問題点について述べる。

なお、本文は同じ著者³⁾によって、平成2年に公表されたものを若干修正したものである。

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となるので、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。

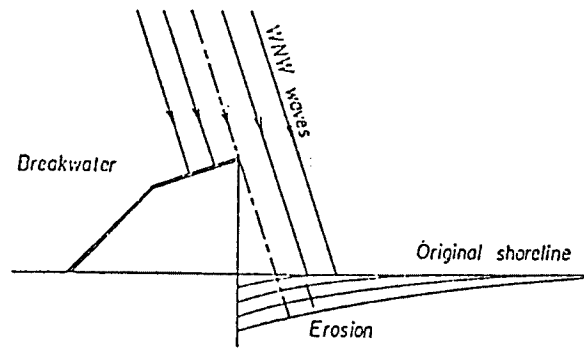
2.1 侵食の主要因

まず Fig. 2.1 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。

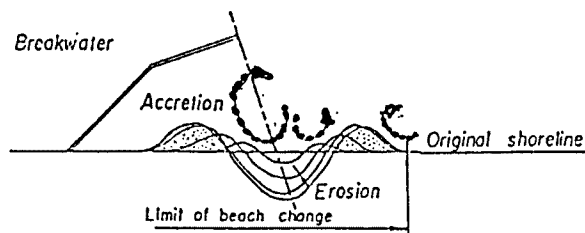
海岸に大規模な海岸構造物が建設されると、1) 沿岸漂砂が阻止され、漂砂の不連続性により、2) 防波堤のような大規模の構造物による波浪の変形とそれに伴う海浜流の形成より海岸侵食が起こり、3) 侵食対策として建設された堤防、護岸などの前面の砂浜が消失すると、反射波の発生により、海岸侵食は助長されることはよく知られている。

2.2 海岸侵食の機構(1)

このような海岸侵食は Fig. 2.1 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、Fig. 2.1 (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

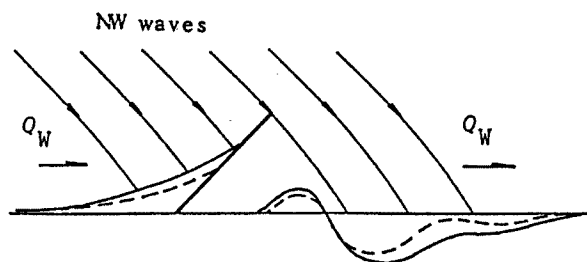


(a) In the case of erosion cause of 1)

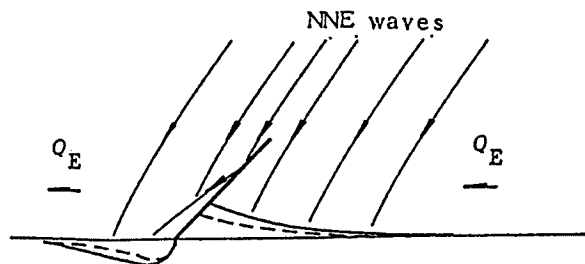


(b) In the case of erosion cause of 2)

Fig. 2.1. Two mechanisms for beach erosion due to coastal structure and their characteristics.



(a) In the case of NW wave



(b) In the case of NNE wave

Fig. 2.2. Mechanism of beach erosion due to two predominant waves of different incident wave directions.

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、Fig. 2.1 (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存在するが、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、海岸侵食にともな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、また沖方向に流出、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設にともなって、潮流特性が変化するような場合で、前述したように細粒の土砂があると、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送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。

2.3 海岸侵食の機構(2)

前述した場合には、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Fig. 2.2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。

1) 構造物の右側の侵食機構

NW波による海浜変形はFig. 2.1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Fig. 2.2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)による海浜循環流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こらず、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、これらの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進入し、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。

2) 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、一般にはFig. 2.2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の沿岸漂砂をもたらす、かえって侵食される場合も起こるのである。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、その結

果を説明する。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) 海浜流モデルであるが、それらの概要については第2報に述べられるので、ここでは省略する。

3.1 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、Fig. 3.1 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 $T = 8 \text{ sec}$ 、波高 $H = 2 \text{ m}$ 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 Fig. 3.2 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、Fig. 3.1 において構造物を離岸距離 $b = 400 \text{ m}$ とし、 $a = 150, 300 \text{ m}$ 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 Fig. 3.3 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。

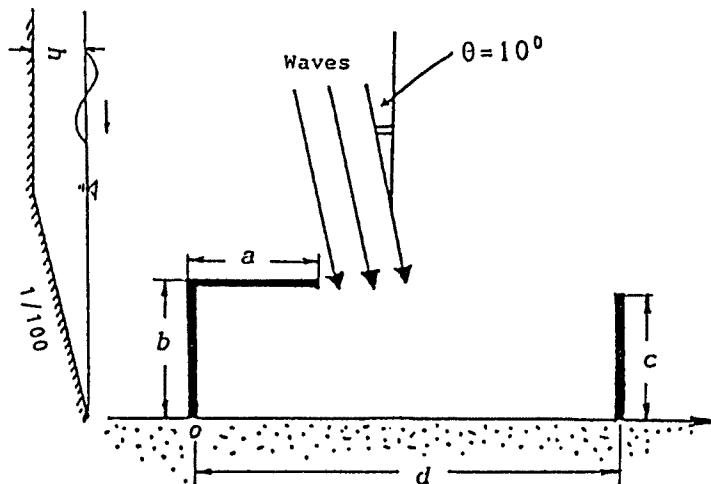


Fig. 3.1. Model sandy beach for numerical simulation of shoreline change and its dimensions.

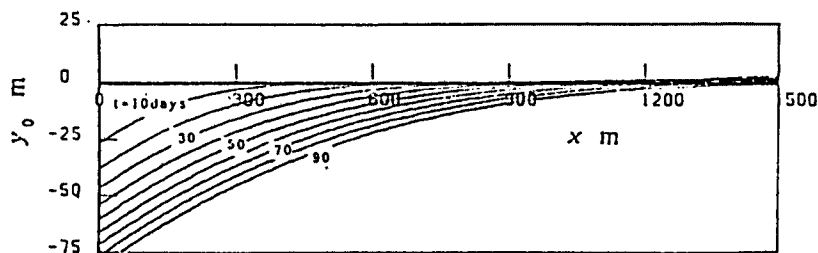


Fig. 3.2. Shoreline change in the case of erosion cause of 1) where horizontal length of breakwater $a=0$.

(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われる。すなわ

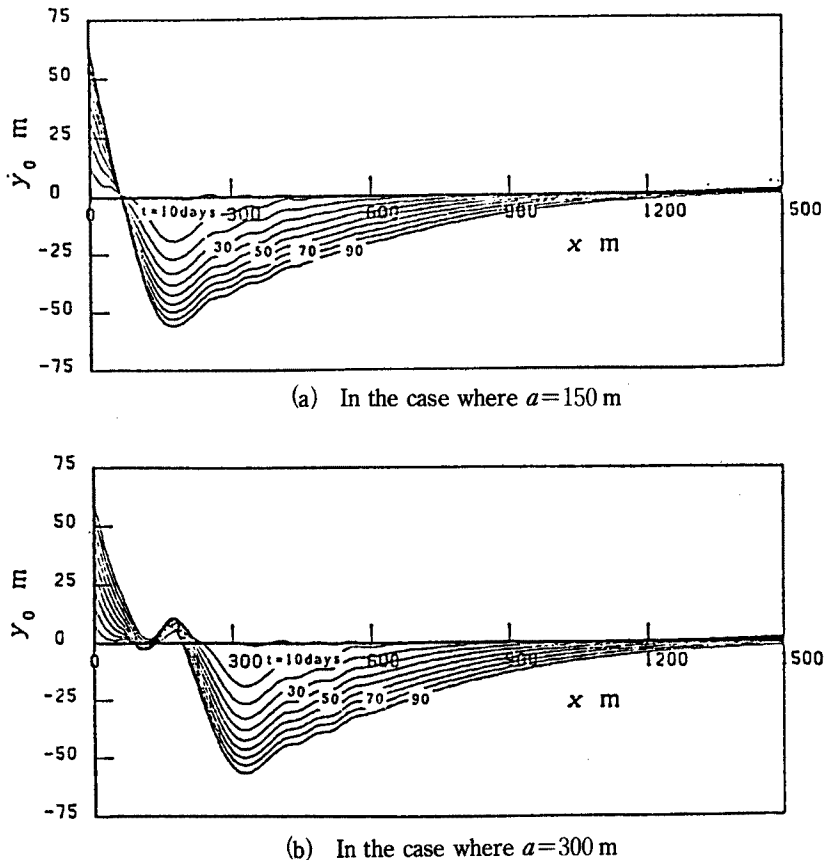


Fig. 3.3. Shoreline change in the case of erosion cause of 1) where horizontal lengths of breakwater are changed.

ち、 $a=0$ で、かつ $Q_w=0$ の場合がFig. 3.2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依り、汀線変化がどのように変わるかを示したものがFig. 3.3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われることであり、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) Fig. 3.3 (a) および (b) をさらに比較すると、最も汀線が後退する位置は波向き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ほとんど関係せず、侵食波はしだいに時間発展することがわかる。

次に、Fig. 3.1 において、構造物の下手側の $d=2000$ mの位置に海浜変形の境界条件（この場合は $Q_w=0$ ）となるような突堤（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Fig. 3.4 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もかわらず小さく、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れる。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

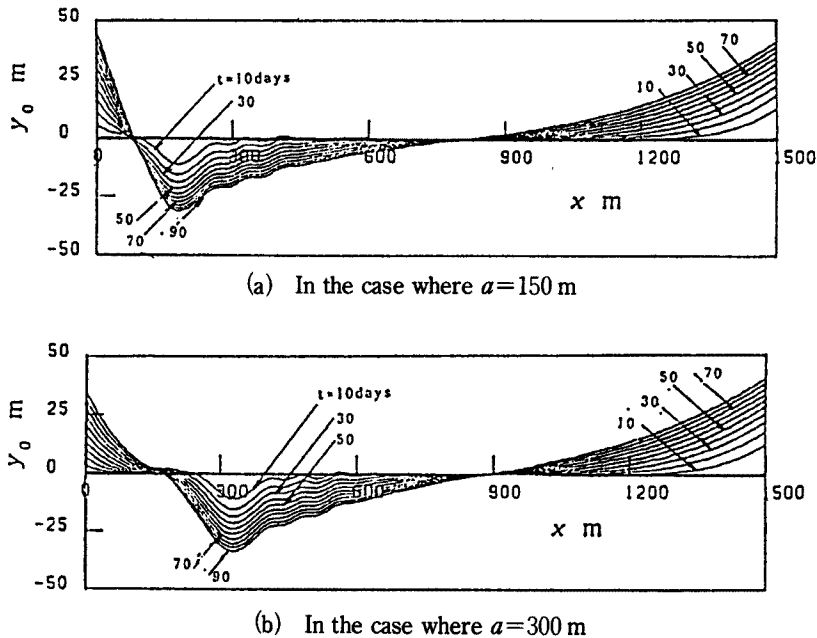


Fig. 3.4. Shoreline change in the case of erosion cause of 1) where a small groin is constructed at the down coast end and horizontal lengths of breakwater are changed.

いようである。

3.3 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) 吹送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来襲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、土屋、松山、鈴木³⁾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 Fig. 3.1 に示すような海域で、 $h=10$ m, $a=2$ km, $c=0$ で、波浪条件とし周期 $T=7$ sec, および波高 $H=4$ m で直角入射 $\theta=0$ の場合である。

まず、Fig. 3.5 (a) 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線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 Fig. 3.5 (b) 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、岸に向かう相対する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組の冲向きの循環によっては堆積が生じることになるわけである。このことはすでに Fig. 2.1 (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、また相補的な冲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することになる。

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

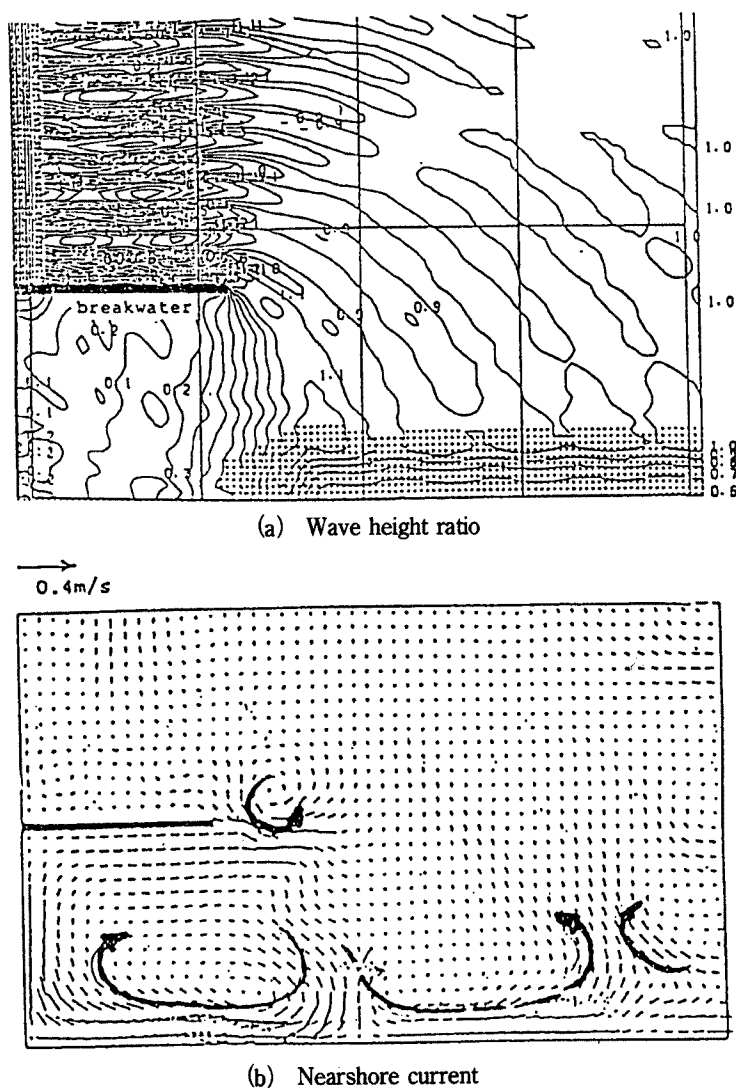


Fig. 3.5. Spatial distributions of wave height ratio and nearshore current in the area where an offshore breakwater is constructed.

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 Fig. 3.6 (a) および (b) 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。Fig. 3.6 (b) 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 Fig. 3.6 (a) 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、このことは逆に防波堤を延長すると、前述したような機構で港内に漂砂が進入してくることを理解させるものである。

3.4 現地海岸への適用

上越、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み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

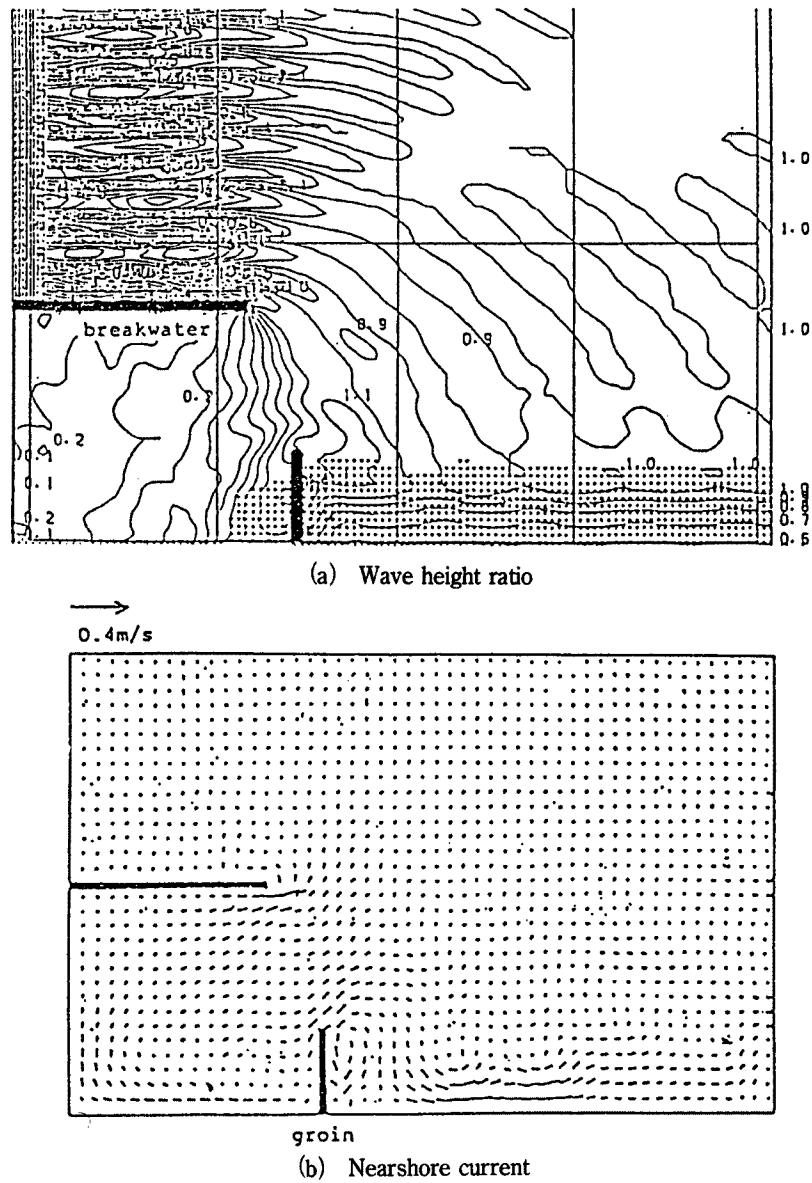


Fig. 3.6. Spatial distributions of wave height ratio and nearshore current in the area where an offshore breakwater and a small groin are constructed.

とするこの海岸の汀線変化を Fig. 3.7 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いたわけで、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1 km程度で、ちょうど Fig. 3.3 (a) のような状況に近く、Fig. 3.7 に示され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の後退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

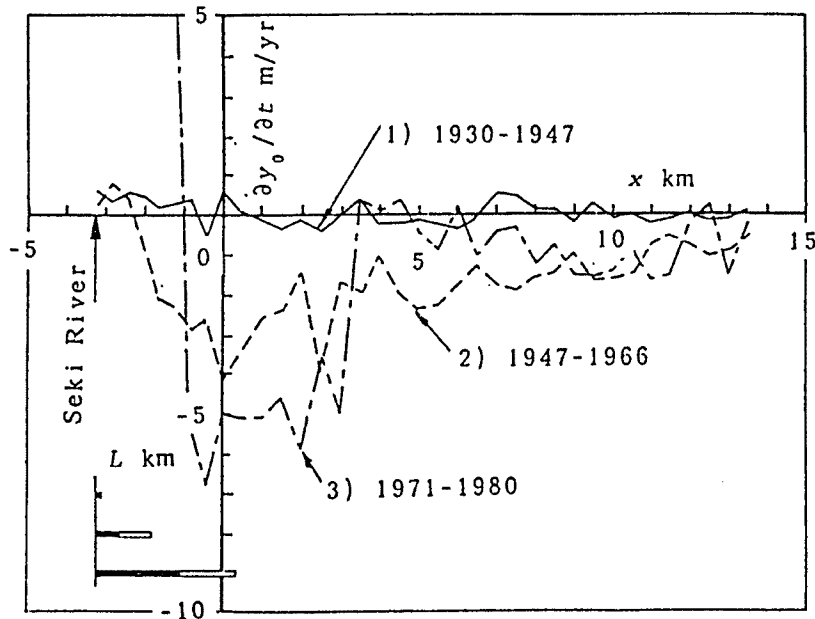


Fig. 3.7. Actual shoreline change at Naoetsu harbour where the data shown are expressed in terms of values averaged between the periods mentioned.

多分前述した Fig. 2.2 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。

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、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 Fig. 3.7 の作成には建設省高田工事事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

- 1) 土屋義人・河田恵昭・山下隆男：大渦海岸侵食防止対策模型実験，（財）防災研究協会，1988，pp. 98-115.
- 2) 宇多高明・野口賢二：大渦海岸の侵食機構に関する一考察，海岸工学論文集，第37巻，1990，pp. 474-478.
- 3) 土屋義人・山下隆男・都丸徳治：大規模海岸構造物による海岸侵食の機構，海岸工学論文集，第38巻，1991，pp. 436-440.