

# 海蝕崖の侵蝕に関する実験的研究

堀 川 清 司\*・砂 村 継 夫\*\*

## 1. 緒 言

波による海蝕崖の侵蝕機構を把握することは工学的観点からしても重要なことと思われる。しかし現状では、現地でその機構を調査することは非常に困難なことである。海蝕崖の侵蝕という現象には多くの要因が関与しているが、ここではモデルとして福島県大熊町海岸を選び、二、三の主要因のみを考慮して二次元水路を用いて実験を行なった。実験結果をもとに、海蝕崖の侵蝕機構ならびに侵蝕距離の定量的問題などについて若干の考察を述べる。

## 2. 福島県大熊町海岸での海蝕崖の侵蝕状況について

第 14 回海岸工学講演会で報告したように<sup>1)</sup>、当海岸(図-1)の海蝕崖(図-2, 3)は年々侵蝕をうけて後退

図-1 調査地域

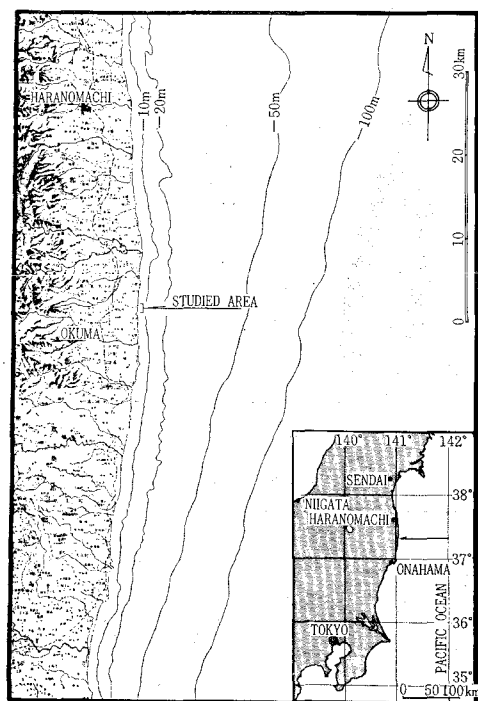


図-2 調査地域の地形

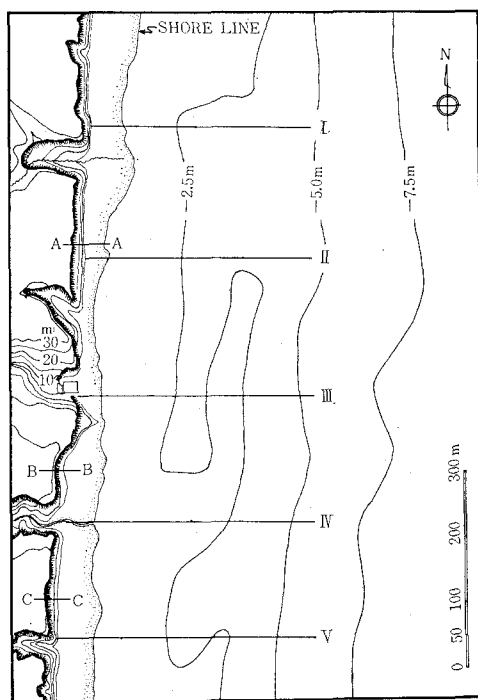
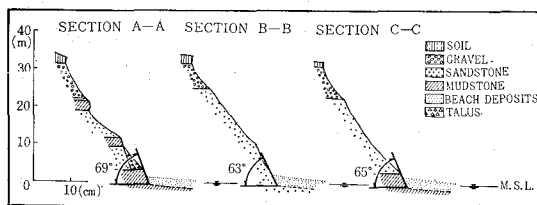


図-3 地形断面図



している。海蝕崖(以下崖とよぶ)の高度は平均海面上30~35 mであり、崖には第三系・鮮新統の軟弱な砂岩、比較的固結した泥岩および崖の頂部には段丘礫層が露出し、崖の基部での基盤の傾斜は約65°である(図-3)。平時においては図-3に示すように、崖の基部では海浜堆積物(崩落した段丘礫と中央粒径約0.3~0.5 mmの砂が主)が基盤をおおっている。Jet boring<sup>\*)</sup>の結果では海底堆積物の厚さは最大2 m程度で、水深が増すに

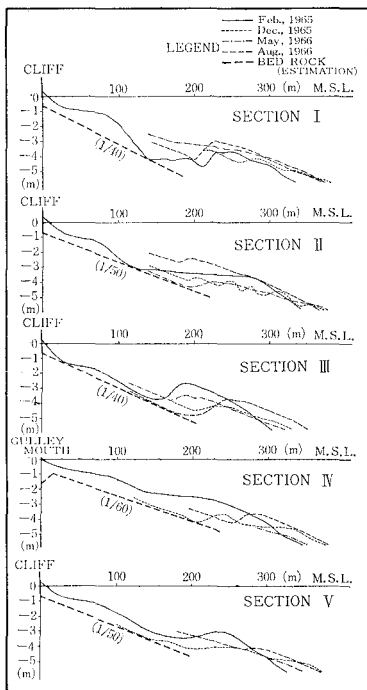
\* 正会員 工博 東京大学教授 工学部

\*\* 学生会員 東京大学大学院工学系研究科

\* 圧力水をノズルから噴出させて、パイプなどの自重による沈下量から地質を調べる方法

つれて漸次減少し水深 10 m 付近から基盤が露出する。現地調査ならびに Jet boring の結果より、崖の基部での基盤はほぼ平均干潮位（平均海面下約 0.7 m）付近にあるものと考えられる。一応、平均干潮位に一致すると仮定し、さらに海面下の基盤は直線であると仮定して、音響測深機による深浅測量の結果から基盤の勾配を推定してみると、約 1/40~1/60 となる（図-4）。なお当海岸の平均潮差は約 1.3 m である。

図-4 海底縦断面図



航空写真をもとにして求めた 1963 年 10 月 9 日から 1965 年 8 月 31 日までの約 1.8 年間における崖の基部での侵蝕距離は、場所により異なり 1.0~4.8 m で平均約 2 m である<sup>2)</sup>。崖の基部付近の岩石の圧縮強度は、場所により異なり 9.4~38.3 kg/cm<sup>2</sup> で平均 26 kg/cm<sup>2</sup> であり、侵蝕距離と圧縮強度との関係は、かなり点のばらつきはあるが圧縮強度が増大すると侵蝕距離は減少する傾向がみられる<sup>3)</sup>。なお上述した岩石の圧縮強度は 48 時間水中に浸した湿潤状態のものであり、試験は直径 5 cm 高さ約 10 cm の円柱形の試料で行なわれたものである。また荷重速度は 0.2 kg/cm<sup>2</sup>/sec である。必ずしも崖の基部付近の岩石のものではないが、岩石の他の力学的性質を参考までに付記すると、乾燥密度 1.1~1.4 g/cm<sup>3</sup>、空げき率 35~55%、ぜい性度\* 14~15 などである。

当海岸では 1965 年 2 月以前は波浪観測を行なってい

\* 常温常圧下での岩石のもろさの尺度として、圧縮強度  $S_c$  と引張強度  $S_t$  との比、 $S_c/S_t$  を用い、これをぜい性度とよぶ。なお、当地域の岩石の引張強度は圧裂引張試験による。

ないので、小名浜（図-1 参照）での目視観測による波高の資料をもとに、1963 年 10 月 9 日から 1965 年 8 月

図-5 小名浜での波高出現頻度

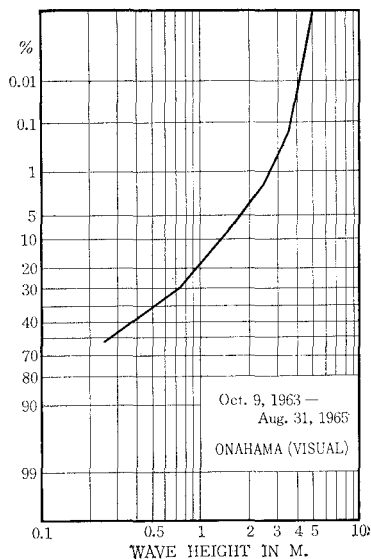


図-6 小名浜での目視観測による波高と大熊町海岸での有義波高との関係

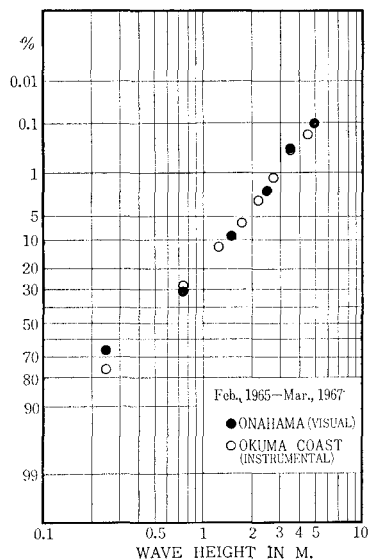
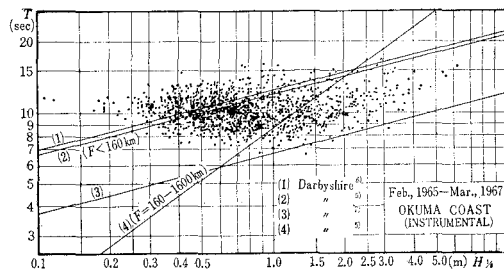


図-7 大熊町海岸での有義波高と周期との関係



31 日までの約 1.8 年間の波高の出現頻度を求めてみると図—5 のようになる。1965 年 2 月から 1967 年 3 月までの約 2.2 年間の小名浜での目視観測による波高の出現頻度と当海岸での水圧式波高計（設置水深約 10 m）による有義波高のそれは、図—6 に示すようにほぼ等しい。したがって 1965 年 2 月以前においても両地点での波高はほぼ等しい頻度で出現していると考えてもよいであろう。つぎに 1965 年 2 月から 1967 年 3 月までの当海岸における有義波高と周期との関係を調べてみると、図—7 のようになりかなり点がばらつく。波高 1.5 m 以下の波浪の周期は、ほぼ一定でかなり長周期である。これはうねりの成分が入っているためと考えられる。また短周期の波を把えることがむずかしい水圧式波高計の感度の問題も考慮せねばならないであろう。参考までに Darbyshire の結果<sup>5)~7)</sup>を図中に示しておく。

### 3. 実験条件について

崖の侵蝕に影響を及ぼす要因は、崖基部での波の侵蝕力、崖基部での岩石の抵抗力、法面崩壊に伴う土砂量、および降雨による法面侵蝕などがある<sup>9)</sup>が、ここでは崖基部での波の侵蝕力と岩石の抵抗力のみを考慮し他の要因は無視する。実験で崖の基部での侵蝕状態を知るためには、基部での波の諸特性と岩石の力学的諸特性を相似にする必要がある。しかし現地において基部での波の諸特性が明らかでない現状では、浅海域の波の特性に Froude の相似則を適用する以外に方法がない。したがって波には Froude の相似則が適用できるものと考え、幾何学的縮尺を 1/25 とすると時間縮尺は 1/5 となる。

1963 年 10 月 9 日から 1965 年 8 月 31 日までの約 1.8 年間の小名浜での波高の出現頻度は図—5 に示した。先に検討したように図—5 の結果が当海岸にも適用できるものと考え。当海岸の崖を侵蝕する波浪の波高は 1.7 m 以上と考えられる<sup>9)</sup>が、ここでは 2.0 m 以上の波高を対象にする。図—5 によると 2.0 m 以上の波高の出現頻度は、全体の 3.5% を占め、約 546 時間出現したものと考える。さらに波高 2.0 m 以上の波浪を波高 2.0 m の波浪で代表させ、1965 年 2 月以前の波浪にも図—7 の結果が適用できるものとして、周期を求めてみると 8~15 sec、平均 11 sec 程度になる。したがって実験波の波高は 8 cm、周期 2.2 sec、実験波の作用時間は 109 時間となるが、後述するように造波装置の性能から周期は 2.0 sec（現地に換算して 10 sec）とした。実験潮位は平均海面に一致させた。前述したように海底の基盤は海底堆積物に覆われている。この堆積物は砂、シルトなどで構成されていると考えられ、季節的变化も著しいため、実験ではこの堆積物を無視し基盤のみを考慮して模型の海底地形は 1/40 の一様勾配をつけた\*。なお海底地形は

後述する模型材料と同じもので作られている。崖の基部での水深は 2.8 cm（現地に換算して 0.7 m）である。模型の崖の高さは 30 cm で現地に換算して 7.5 m であり、現地の高さの約 1/4 である。実験では崖の基部での侵蝕状態をみることを目的としているので、模型の崖の高さを現地に換算してみても現地と同じ高さにする必要はないと考えたからである。また崖は平行に後退しているものと考えて、模型の崖の傾斜角は、現地の崖基部の基盤の傾斜角が約 65° であるので、それに一致させ 65° とした。なお現地の崖は前述したように砂岩、泥岩などで構成されているが、模型の崖は基部から頂部まで同一の模型材料で作られている。

現地での岩石のすべての力学的性質を満たすような岩石の模型を作ることは非常に困難なことと思われる。また崖の侵蝕機構が明確にわかっていない現在では、妥当な相似則を見出すこともむずかしい。崖の侵蝕に関与する岩石の力学的性質は、圧縮強度、摩耗硬度、せん断強度などが考えられるが、圧縮強度以外の岩石の力学的性質を示す現地の詳細な資料がないため、ここでは侵蝕に対する岩石の抵抗力を圧縮強度で代表させて考えることにする。さらに相似則については、波に適用した Froude の相似則が岩石にも適用できるものと仮定する。圧縮強度は  $[FL^{-2}]$  の次元をもつゆえ、幾何学的縮尺を 1/25 とすると圧縮強度も 1/25 にすればよいことになる。上述した岩石の力学的諸性質のほかに、節理、断層などの岩石中の割れ目が侵蝕に対する岩石の抵抗力に影響をおよぼすことは明らかである。現地でこの影響を定量的に検討することはできなかったが、割れ目の存在を無視することはできない。整形された試料を用いて測定された強度は、岩石の塊の最も強固な部分の強度である<sup>10)</sup>。すなわち試料の中に割れ目が存在していない岩石の強度を示している。前述したように現地の圧縮強度は 9.4~38.3 kg/cm<sup>2</sup> であるが、この値には割れ目の影響が入っていないと考えてよい。割れ目の影響も含めた平均的な岩石の圧縮強度に関する現地の資料がないため、ここでは割れ目の影響も含めた岩石の圧縮強度を一応 10 kg/cm<sup>2</sup> 程度であると仮定する。したがって模型では 0.4 kg/cm<sup>2</sup> 程度の圧縮強度をもつ材料で崖を作ればよいことになる。以下に模型材料について述べる。

### 4. 模型材料について

模型材料はつぎの諸条件を満足しなければならない。

(i) 水に溶解しないこと、(ii) 強度が小さいこと、(iii) 強度が材令にあまり影響されないこと、(iv) 安価なこと、など。海蝕崖に沿っての砂移動を研究するために、Chien<sup>11)</sup> は細砂とベントナイト（粘土鉱物の一種）の混合材料で崖の模型を作っているが、粘土鉱物は吸水すると膨張し、たやすく溶解するので非溶解性の岩石から成

\* 崖の基部の海浜堆積物も無視している。

る崖を表現する材料として用いるには不適當である。また固結剤として石こう、石灰、けいそう土、水ガラスなどを用いた材料は、これらがすべて水に溶解する性質をもつので不適當である。アクリル・アミド系のケミカルグラウト<sup>12)</sup>は硬化時間を任意に変えられるという利点をもつが、強度をある限度以下には低下させることができない欠点をもつ。

上述の諸条件を比較的良好に満足するものに、早強ポルトランドセメント・砂・水を適當な重量配合で混合した固結砂がある。なお混合の際に硬化促進剤としてセメント量の2%の $\text{CaCl}_2$ を加える。以下にこの模型材料の力学的性質(とくに圧縮強度)について述べる。なお砂は豊浦標準砂(中央粒径0.2mm, 淘汰係数<sup>13)</sup>1.1, 比重2.65)を用いている。強度は必ずしも制御の圧縮試験機を用いて測定されたものであり、その値は3~4個の試料の平均値である。まず強度と材令との関係をみてみよう。図-8に、セメント1, 砂150, 水50の重量比で混合した場合の圧縮強度と材令との関係を示す。これにより材料を作ってから約2週間強度がほぼ一定となることがわかる。以下とくにことわらない限り強度は14日強度である。つぎに圧縮強度と試料の大きさとの関係(いわゆる試料の寸法効果 Size effect)を図-9に示す。

図-8 強度と材令との関係

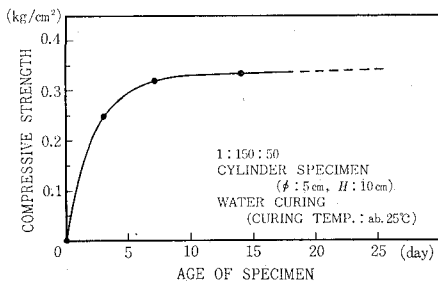
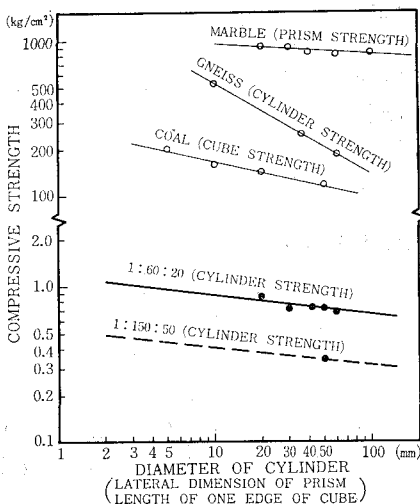


図-9 強度と試料の大きさとの関係 (Size effect)



試料はセメント1, 砂60, 水20の重量比で混合した材料で、試料は直径の2倍の高さをもつ円柱形である。試料が大きくなると破壊の核の存在あるいは破壊が発生する確率が増大するために破壊強度が低下するということが一般的にいわれているが<sup>14)</sup>、この模型材料についても同様な傾向がみられる。なお図-9には、参考までに大理石<sup>15)</sup>、片麻岩<sup>16)</sup>、石炭<sup>17)</sup>などの Size effect を示しておく。

圧縮強度は試料の形、試料の大きさ、試料の乾燥の程度、荷重速度などの試験条件によって異なる<sup>18)</sup>ので、現地の岩石の試験条件と実験室の模型材料の試験条件とを相似にしなければならない。まず試料の形が強度におよぼす影響 (Shape effect とよばれるもの) は、現地、実験室とも円柱形であるので無視できる。つぎに試料の大きさが強度におよぼす影響 (上述した Size effect) について検討する。前述したように現地の岩石試料は直径5cm, 高さ約10cmの円柱形である。幾何学的縮尺を1/25としているので実験室の模型材料は、直径2mm, 高さ4mmの円柱形試料で試験しなければならないことになる。そしてこの大きさの試料で試験した結果、3.で述べたような0.4kg/cm²程度の強度をもつ材料であればよい。しかし上述した模型材料でこの大きさの、しかもこの程度の強度をもつ試料を整形することはほとんど不可能に近いので、図-9に示すようにセメント1, 砂60, 水20の材料による結果を直径2mmのところまで外挿し、さらに Size effect を示す勾配はセメント・砂比によって変化しないものと仮定して、セメント1, 砂150, 水50の場合を推定したものが図中点線で示されているものである。これによれば直径2mmでの強度は約0.5kg/cm²で、この配合(1:150:50)で模型を作った場合、これを現地に換算すると12.5kg/cm²程度となりほぼ満足されるので、模型はセメント1, 砂150, 水50の配合で作った。なお Size effect が存在しないと仮定した場合の強度は現地に換算して約8.3kg/cm²である。試料の乾燥の程度\*および荷重速度などが強度におよぼす影響は、Size effect に比して小さいと考えられるのでここでは検討していない。

参考までにこの模型材料(1:150:50)の他の力学的性質を付記すると、乾燥密度1.4~1.6g/cm³, 空げき率約40%, ぜい性度\*\*約6である。

なおこの模型材料は固結剤としてセメントを用いているため、養生方法、養生温度により強度が異なってくるのが欠点である。さらに模型材料の構成粒子は砂(中央粒径0.2mm)であるので、現地に換算した場合、現地の岩石(砂岩あるいは泥岩)の構成粒子よりも大きく

\* 現地、実験室とも試料は湿潤状態のもの。

\*\* 引張強度は圧引引張試験による。直径5cm, 厚み5cmの円板試料。試料の数は2個。

なり Scale effect の問題が生じてくる。

## 5. 実験装置ならびに実験方法

実験は長さ約 25 m, 幅 0.6 m, 高さ 0.8 m の二次元造波水路を用いた。造波機はフラップ式で、周期は無段変速機により 0.5 sec から 2.0 sec まで連続的に変化させることができ、波高は造波板のストロークを変えることにより調整できる。水路の一端に前述した模型材料で崖を作り、海底地形も同じ模型材料で作る 1/40 の一様勾配をつけた (図-10)。セメントペーストが凝結してから崖の頂部まで水に浸し 2 週間水中養生 (養生温度約 25°C) を行ない、しかるのち水位を実験潮位に合わせて実験を開始した。実験は前述した実験条件、すなわち波高 8 cm (水路の一樣水深部 32.8 cm で測定)、周期 2.0 sec, 実験波の作用時間 109 時間にしたがった。10~20 時間ごとに崖の侵蝕状況ならびに崖基部での堆積物の断面形状を測定 (図-11) し、1 日平均 20 時間前後実験波を作用させ 6 日間で実験を終了した。したがってその間、崖を構成する模型材料の強度の増加は微小であり無視できるものと考えられる (図-8 参照)。

図-10 実験装置

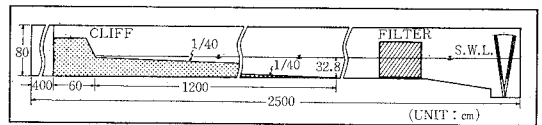


図-11 崖の断面図ならびに断面測定場所

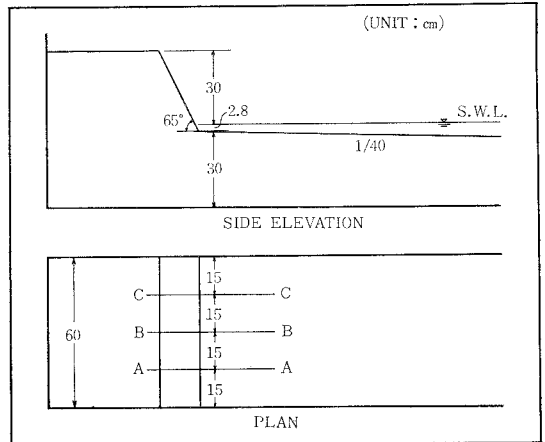


図-12 侵蝕および堆積状況を示す断面図

## 6. 実験結果ならびに考察

実験波は崖の前面約 4 m の所で砕波し (砕波水深約 13 cm), 砕波後の波が崖に衝突する。衝突前の波高は約 2 cm である。当然ながら最も弱い部分から侵蝕が始まる。図-12 に侵蝕状況ならびに侵蝕に伴って生じた堆積物\*の断面図を掲げる。図-13 は砂の堆積状況を示す平面図である。図-12 の各断面より侵蝕距離  $D$  の時間的变化, ならびに断面積を計算し単位幅当りの侵蝕量  $V$  (図-14 参照) の時間的变化を求めたものが図-15, 16 である。ともにそれらの時間的变化は S 字型を示しており、立ち上り時間は A-A, B-B, C-C 断面の順で、ある程度時間がたつとほぼ平衡状態に達する。

\* 完全に分離した砂粒子である。以下この堆積物を砂とよぶ。なおこの堆積物は、崖からのみ供給されたものではなく、海底侵蝕に伴って生じたものをも含む。

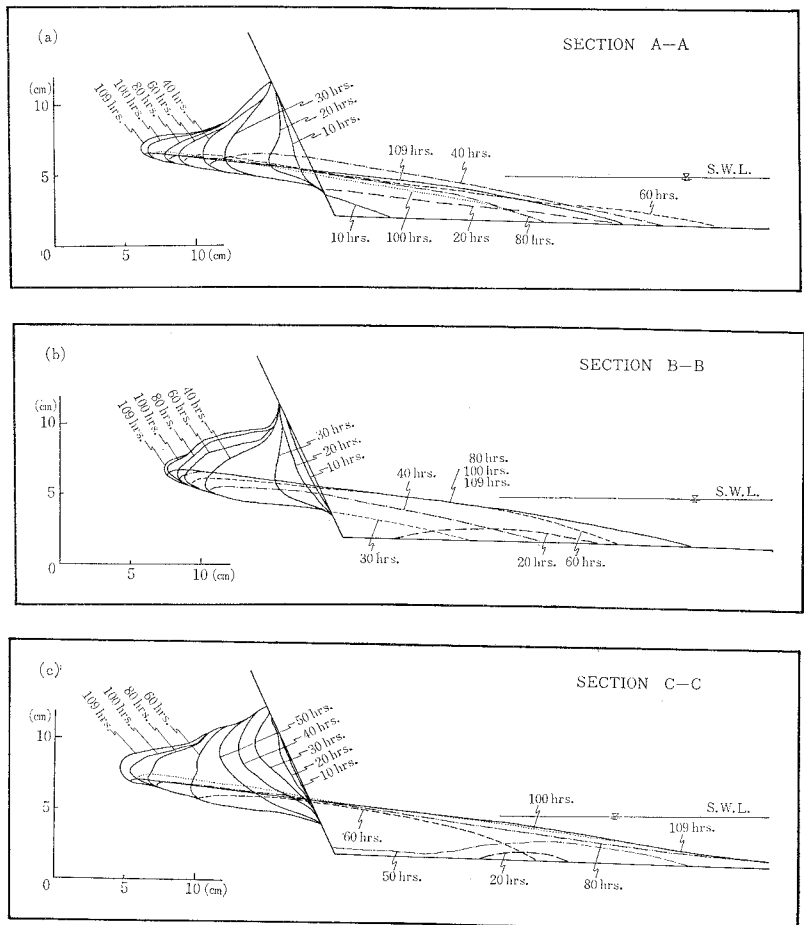


図-13 堆積状況を示す平面図

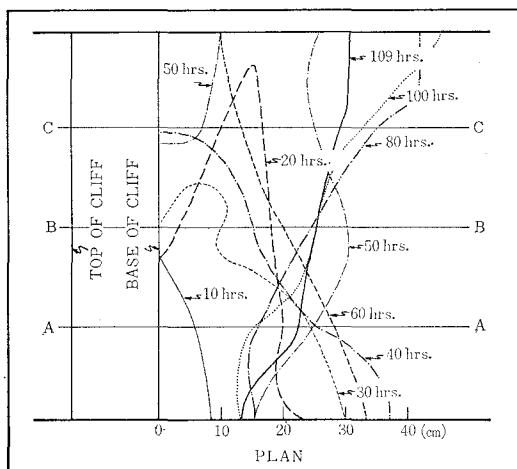


図-14

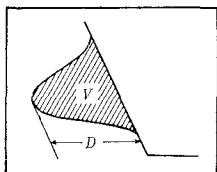


図-15 侵蝕距離の時間的変化

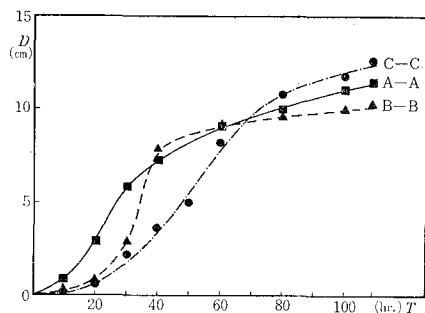


図-16 侵蝕量の時間的変化

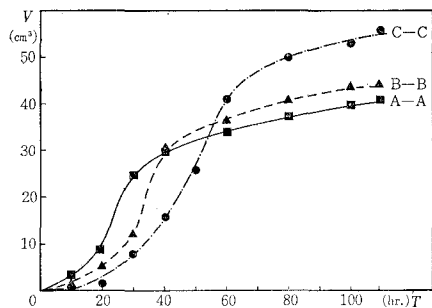


図-17 Notch の変形を示す模式図

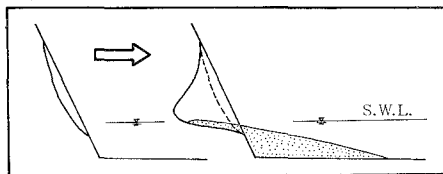
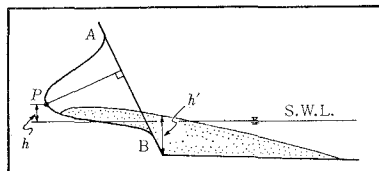
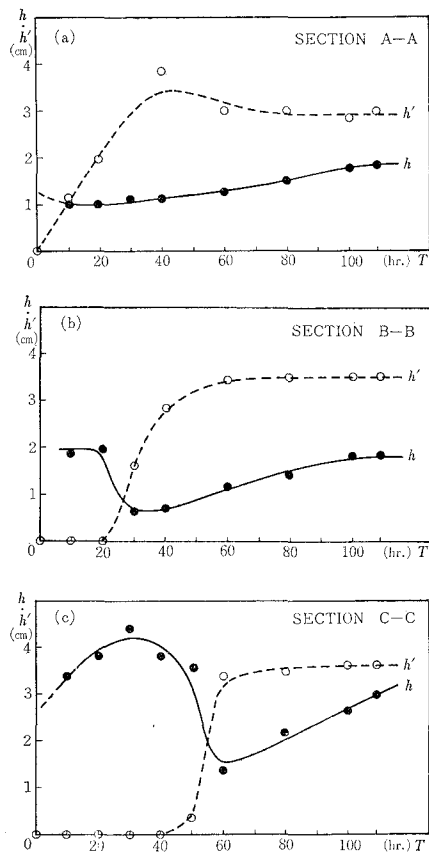


図-18

図-19  $h, h'$  の時間的変化

様子を見るために、図-18 に示すように、ある時刻の Notch 上の点から法面 AB に垂線を下し、その垂線の長さが最大となるような点 P の静水面上の高さを  $h$  とし、その時刻における砂の厚さを  $h'$  とし、各断面につき  $h, h'$  の時間的変化を示したものが図-19 である。A-A 断面でははっきりしていないが、B-B および C-C 断面では崖の基部に砂が堆積しはじめると、すなわち  $h'$  が大きくなると  $h$  は急激に小さくなり Notch が急激に変形したことを示している(写真-1~3 参照)。

図-15 より最終時間の侵蝕距離を求めてみると 10~12.5cm である。図-12 より明らかなように各断面とも Notch<sup>19)</sup> が形成され、それが時間とともに発達している。崖の基部に砂が堆積しはじめると、波が変形し Notch の形が 図-17 に示すような変化を示す。この

写真-1 20 時間 後

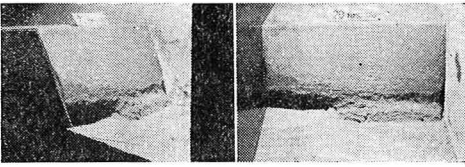


写真-2 40 時間 後

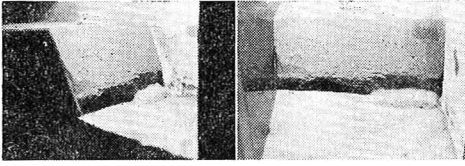
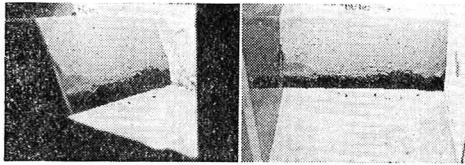
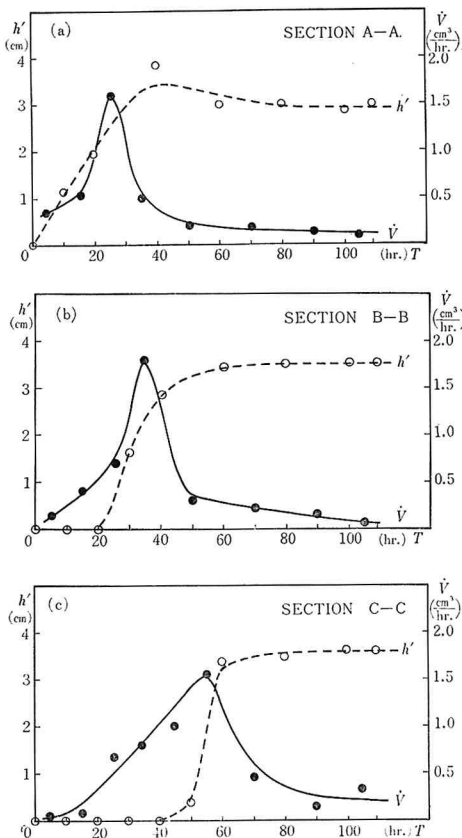


写真-3 60 時間 後

図-20 侵蝕速度および  $h'$  の時間的变化

序 (A-A, B-B, C-C 断面の順) に等しく, 砂が侵蝕の機構と密接な関係にあると考えられる。そこで, 図-16 から単位時間当りの侵蝕量すなわち平均侵蝕速度  $\dot{V}$  を求めて,  $\dot{V}$  と  $h'$  との関係を示したものが図-20 である。各断面とも  $\dot{V}_{\text{peak}}$  は崖の基部での砂の厚さが平衡状態に達する直前に現われ, peak 時の砂の厚さは各断面ともほぼ同じで 2~2.5 cm である。すなわちこの程度の厚さで砂が堆積している時が, 侵蝕が最も激しいことを示している。崖基部に砂が堆積すると, 波が変形すると同時に 図-21 に示すように, 砂を巻き込んだ渦が形成され, これが侵蝕を促進し, また前述したような Notch の変形をも促進すると考えられる。崖の基部での砂や礫が侵蝕の道具 (Abrasive tools) として働き崖の侵蝕を促進するということは, 従来地形学の教科書で定性的にいわれていることである<sup>20)~23)</sup>。図-12 に示すような Notch の発達は, 砂が侵蝕の道具として働くこと以外に, 崖の基部での砂の堆積の影響を受けて波が変形することにも関係する。Notch の上限は, 侵蝕開始前の波の遡上高さにほぼ一致し, 下限は波が引いた時の谷 (trough) の位置に一致する (図-22)。

図-21

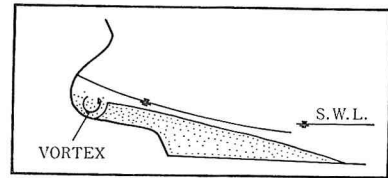


図-22 Notch の上限と下限を示す模式図

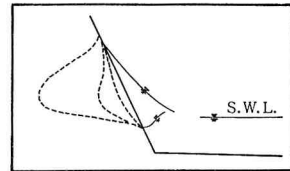
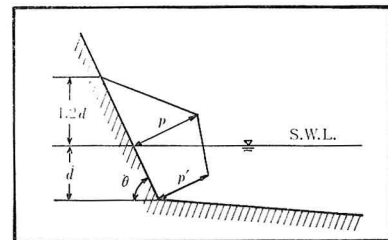


図-23 砕波後の波の圧力分布



砕波後の波の圧力分布<sup>24)</sup>は, 近似的には 図-23 のようになると考えられる。図中  $p$ ,  $p'$  は次式で与えられるが, これは海底が 1/15 勾配の結果であるので本実験にそのまま適用することはできないが, 最大値を与える目安として使用することにする。

$$\left. \begin{aligned} p &= 2.8 wd \sin^2 \theta \\ p' &= 2.2 wd \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

また崖の基部に砂がない時は静水面よりかなり高い所 (静水面上 2~4 cm) が深く侵蝕されていることを示している (図-12 (b), (c))。上述した侵蝕距離および侵蝕量の立ち上り時間の順序は, 崖の基部に砂が堆積する順

ここに  $w$  は水の単位体積重量である。式(1)に  $d=2.8(\text{cm})$ ,  $w=1.0(\text{gr/cm}^3)$ ,  $\theta=65^\circ$  を代入して計算すると,  $p=6.5 \text{ gr/cm}^2$ ,  $p'=6.2 \text{ gr/cm}^2$  となる。前述したように崖を構成する模型材料の圧縮強度は, Size effect の存在のために強度としてどこかの値を探るかが問題となるが, どこかの値を探っても圧縮強度(図-9の点線参照)は波圧強度に比してはるかに大きく, また初期の Notch の断面形\*において最も深く侵蝕されている箇所は, 波圧強度が最大の静水面付近ではなく静水面よりはるかに上部にある(図-12(b), (c) および図-19(b), (c) 参照)ことからして, 本実験における崖の侵蝕は砕波後の圧力によって惹起されたものではないと考えられる。前述したように Notch の上限が波の遡上高さにほぼ一致し, 下限が引波の際の谷の位置に一致することからみて, 初期の Notch の形成は遡上および引波の際の法面に沿う流れによる砂粒子の分離に起因すると考えることが妥当であろう。

現地では上述したような Notch は形成されていない。これは以下に述べる理由によるものである。本実験では割れ目の影響を含めた岩石の強度は考慮しているが, 模型の崖には節理, 断層などの割れ目は存在していない。つぎに, 前述したように模型の崖の高さは, 現地に換算して現地の高さの約 1/4 である。また現地では降雨による法面侵食が行なわれていると考えられるが, 実験ではこの要因を無視している。さらに水路の側壁の影響などがある。

前述したように現地での崖の侵蝕距離は 1.8 年間に 1.0~4.8 m である。実験での侵蝕距離が 10~12.5 cm であるので, 現地に換算してみると 2.5~3.1 m 程度となりほぼ満足できる値である。しかし現地では同じ特性をもつ波が連続して襲来するわけでもなく, また潮位も変化するし, 基部侵蝕に起因する崩落などの影響がある。実験では海浜堆積物および海底堆積物を無視して一様勾配の海底地形を作っているが, 海底摩擦係数や乱れの減衰係数は当然ながら現地と相似にはなっておらず, したがって砕波後の波の変形状態<sup>25)</sup>も現地と相似になっているとは考えられない。また二次元水路を用いているため波は崖に直角に侵入してくる。したがって崖の基部に堆積した砂が崖に沿って移動することは少ない。侵蝕の道具として働く砂が沿岸方向に移動した場合, どのような侵蝕過程を示すかを現在平面水槽を用いて実験中である。4. の最後に述べた Scale effect の問題に関しては検討していない。

なお上述したように相似になっていない要因が多いにもかかわらず, 侵蝕距離がほぼ妥当な値を示していることはつぎの理由によるものと考えられる。ここで対象とした波高 2 m 以上の波が襲来する時には, 一般に, 潮

位は平均海面よりは平均高潮位(平均海面上約 0.7 m)付近にあると考えられる。したがって潮位が平均高潮位にあるとして, 図-4 より砕波点の位置を求めてみると, 波高 2 m, 周期 10 sec の波の砕波水深が約 3 m であるので, 崖の前面約 90~150 m 付近になる。実験では前述したように崖の前面約 4 m 付近で砕波している。これを現地に換算すると約 100 m となり現地とほぼ一致する。そのため近似的には崖の前面での波の特性が相似になっていると考えられる。崩落にともなう土砂量は明らかに現地と相似でない。現地で崩落物が崖の基部にあまり存在していないということは, たえず波の運搬作用が働いて沖へ運ばれていると考えてよい。波高 2 m 以下の波は実験では考慮していないが, 現地ではこの波によって崖基部の崩落物は沖へ運搬されている\*と考えられる。したがって波高 2 m 以上の波を対象とした本実験では, 崩落物の影響を無視しても結果には影響なかったものと思われる。

## 7. 結 語

実験結果からつぎのことがいえよう。

- 1) 適当な模型材料を用いれば波による海蝕崖侵蝕に関する実験が可能であり, かなり妥当な結果を求めることができる。
- 2) 砂が侵蝕の道具として働き, 侵蝕を促進する。
- 3) 砕波後の波が作用する場所で, しかも割れ目が存在しない崖における初期の Notch の形成は, 波の圧力ではなく, 遡上および引波の際の法面に沿う流れによって岩石の構成粒子が分離させられることに起因する(ただし崖の基部に堆積物がない場合)。

岩石中の割れ目が侵蝕におよぼす影響, また海浜堆積物や海底堆積物あるいは潮位などの影響, さらに Scale effect の影響などの諸問題が今後の課題として残る。

最後に, 本研究をなすにあたり有益な助言を戴いた東京大学生産技術研究所 三木五三郎助教授, 東京大学工学部資源開発工学科 西松裕一助教授, 工学部土木工学科土質研究室ならびにコンクリート研究室の方々, その他多くの方々に謝意を表する。なおこの研究は文部省科学研究費による研究の一部であることを付記する。

## 参 考 文 献

- 1) 堀川清司・砂村継夫: 航空写真による海蝕崖の後退に関する研究, 第14回海岸工学講演会講演集, 1967.
- 2) 前掲 1)
- 3) Horikawa, K. and T. Sunamura: A Study on Erosion of Coastal Cliffs by Using Aerial Photographs, Coastal Engg. in Japan, 10, 1967.
- 4) 山口梅太郎・西松裕一: 岩石力学入門, p. 108, 東京大学出版会, 1967.
- 5) Darbyshire, J.: The Generation of Waves by Wind, Proc. Roy. Soc. London, Ser. A, 215, pp. 299-328, 1952.
- 6) Darbyshire, J.: An Investigation of Storm Waves

\* 崖の基部に砂が堆積する以前の Notch の断面形をさす。



- in the North Atlantic Ocean, Proc. Roy. Soc. London, Ser. A, 230, pp. 560-569, 1955.
- 7) Darbyshire, J. : A Further Investigation of Wind Generated Waves, Deutsche Hydrogr. Zeitschrift, 12, pp. 1-13, 1959.
- 8) 前掲 1)
- 9) 前掲 1)
- 10) 前掲 4), p. 145.
- 11) Chien, N. : Sediment Motion at the Vicinity of a Littoral Bareier, Beach Erosion Board, Bull., 10, 1956.
- 12) 三木五三郎 : 地盤注入用各種グラウトの注入特性, 第 22 回土木学会年次学術講演会講演集, 1967.
- 13) Trask, P.D. : Origin and Environments of Source of Sediments of Petroleum, Nat. Res. Coun. Rept. Comm. Sed. pp. 67-76, 1932.
- 14) 前掲 4), p. 114.
- 15) Mogi, K. : The Influence of the Dimensions of Specimens on the Fracture Strength, Bull. Earthq. Res. Inst., 40, 1962.
- 16) Bernaix, J. : La Mesure de la Résistance des Roches, Proc. Geotechnical Conf., Oslo, 1967.
- 17) Evans, I. and C.D. Pomeroy : The Strength of Cubes of Coal in Uniaxial Compression, Mechanical Properties of Non-Metallic Brittle Materials (edited by W.H. Walton), pp. 1-28, Butterworths Scientific Publications, 1958.
- 18) 前掲 4), pp. 111-112.
- 19) 前掲 1)
- 20) Cotton, C.A. : Geomorphology, Whitcombe & Tombs, pp. 408-409, 1960.
- 21) Thornbury, W.D. : Principles of Geomorphology, John Wiley & Sons, pp. 432-433, 1960.
- 22) Bird, E.C.F. : Coastal Landforms, Australian National Univ. Press, p. 50, 1965.
- 23) Zenkovich, V.P. : Processes of Coastal Development, Oliver & Boyd, p. 141, 1967.
- 24) 本間 仁・堀川清司・長谷川直樹 : 海岸堤防に作用する波圧の分布について, 第 10 回海岸工学講演会講演集, 1963.
- 25) Horikawa, K. and C. Kuo : A Study on Wave Transformation inside Surf Zone, Proc. of 10th Conf. on Coastal Engg., 1967.
- \* 波高 2 m 以上の波も崩落物を運搬するであろうが。