

二次元造波水路模型実験による崖侵食の予測

金澤浩明*・佐々木康子**・安原一哉***・村上哲****

1. ま え が き

著者らは前報 (1995, 1999) で, ①茨城県北部海岸においては依然としてかなりの海岸崖侵食が進んでいること, また, ②崖侵食は図-1 のような砂と海水の混相流体の連続的な作用に起因する岩石のアブレーション摩耗によって促進されることを報告した。また, 先の調査を行った後, 岩石のアブレーション摩耗に着目して, 海崖における砕波によって巻き上げられた砂による摩耗現象を室内において再現をするために, 人工軟岩に対する回転摩耗試験を行なって, その特性を明らかにした。そして得られた結果を用いて侵食距離を予測する定式化を行ない, また二次元造波水路を用いた人工崖の侵食実験結果に対し, 予測式の妥当性の検証を行なったところ良好な関係が得られた。そこで本報告では, 前報 (1999) に続いて, 二次元造波水路による模型実験によって崖侵食に及ぼす要因を明らかにするとともに, 模型実験結果に基づいて崖侵食速度の予測式を定式化し, それを現地の崖侵食への適用を試みた。

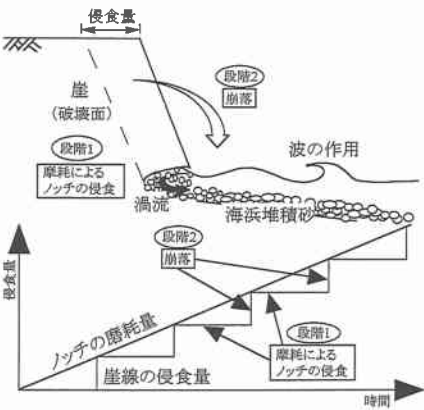


図-1 海岸崖侵食の模式図

2. 模型実験の概要

2.1 実験装置

海岸崖侵食が引き起こされる要因とそのメカニズムを明らかにするため, 堀川・砂村 (1968) の実験に倣い, 図-2 に示すような二次元造波水路による模型実験を行なった。試験手順の概略は以下の通りである。

i) 実験条件に合わせ配合を行なった崖模型供試体の人工軟岩 (砂, 水と早強ポルトランドセメントを混合した固結砂) の打設を行なう。

ii) 崖供試体は恒温室内で3日間空中養生 (打設後, そのまま放置する) させ, その後, これを水浸させ, さらに3日間水中養生を行った。

iii) 養生を終えた供試体を造波水路に設置し, 水位を実験潮位 (26 cm) に合わせ, 現地海象条件のうちに周

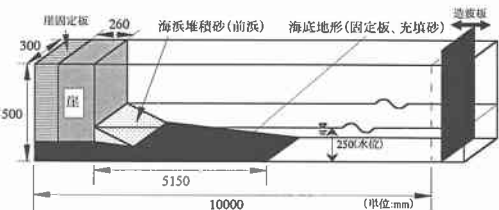


図-2 二次元造波水路の概要図

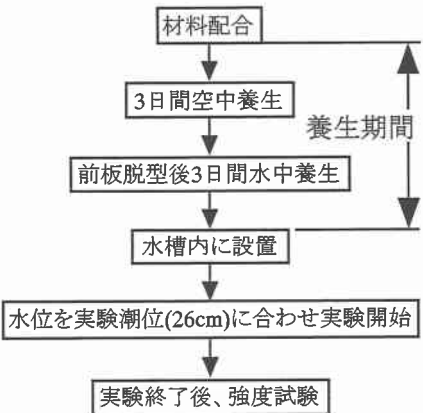


図-3 実験手順のフロー

* 正 会 員 茨城大学技術官 工学部都市システム工学科
** 日本海洋コンサルタンツ (株)
*** フェロー 茨城大学教授 工学部都市システム工学科
**** 正 会 員 茨城大学助手 工学部都市システム工学科

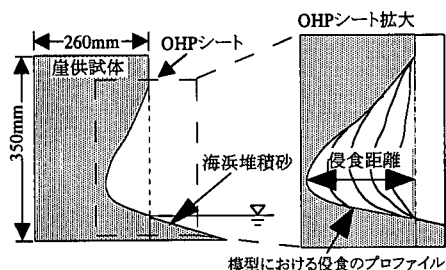


図-4 侵食距離の測定方法

期、波高を模型実験の大きさに変え、繰返し波浪を作用させた。図-3に実験手順のフローを示している。

2.2 実験条件

海岸崖侵食のメカニズムと主たる要因の把握を行なうため、本研究では(1)前浜砂の土粒子密度、(2)前浜砂の粒径、(3)人工崖の圧縮強度、(4)崖前波高のそれぞれが侵食量と侵食速度に及ぼす影響について調べた。試験条件の詳細は以下の通りである。

a) 実験1：侵食に及ぼす前浜砂の土粒子密度の違いによる影響。人工崖の圧縮強度は0.075 MPaに統一した。前浜砂として投入した砂は豊浦標準砂を用い、土粒子密度は 2.64 g/cm^3 とした。実験条件は(i)前浜砂のないもの、(ii)豊浦標準砂(土粒子密度は 2.64 g/cm^3)を投入したもの、(iii)豊浦標準砂に砂鉄を混合したもの(土粒子密度は 3.18 g/cm^3)の3種類とした。

b) 実験2：前浜砂の粒径の違いによる侵食への影響。人工崖の圧縮強度は0.068 MPaで統一した。前浜砂として投入した砂は茨城県日上市河原子海岸から採取してきた砂をふるい分けし、 $106 \sim 250 \mu\text{m}$ 、 $250 \sim 425 \mu\text{m}$ 、 $425 \sim 850 \mu\text{m}$ の3種類の異なる粒径の前浜砂の影響を調べた。前浜砂の土粒子密度は 2.64 g/cm^3 であった。

c) 実験3：人工崖の圧縮強度への影響。用いた材料の早強ポルトランドセメント：豊浦標準砂：水の重量比を変化させ、模型圧縮強度0.029, 0.051, 0.075, 0.191, 0.236, 0.392 MPaの6種類の人工崖を用いて侵食実験を行なった。前浜砂の土粒子密度は 2.64 g/cm^3 に統一した。

d) 実験4：崖前波高が侵食速度に及ぼす影響。崖前波高を1.75, 2.0, 2.25, 2.5 cmと4種類に変化させた。なお、このときの模型圧縮強度は0.043 MPa、前浜砂の密度は 2.64 g/cm^3 に統一した。

2.3 侵食量の定義および測定方法

本研究では、水路の側面にOHPシートを貼り付け、ある経過時間ごとの人工崖の侵食プロファイルをそのシートに直接書きこむことにより測定を行なった。侵食量は測定毎のプロファイルにおける最大距離とした。図-4は侵食距離の測定方法を示したものである。

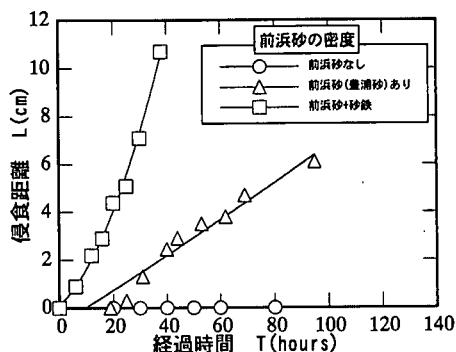


図-5 前浜砂の土粒子密度が侵食に及ぼす影響

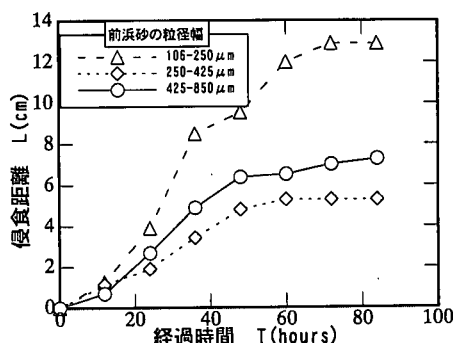


図-6 前浜砂の粒径の違いによる侵食への影響

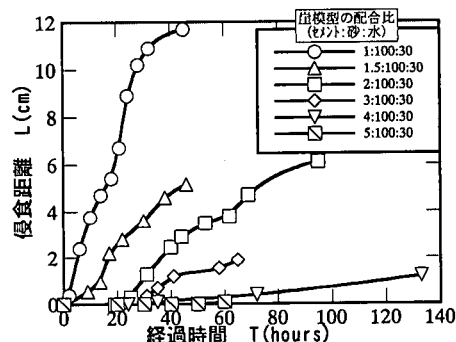


図-7 人工崖の圧縮強度が侵食に及ぼす影響

3. 崖侵食に及ぼす要因の検討と侵食のメカニズム

前述の模型実験において、崖侵食に及ぼす主たる要因の検討を行ない、以下の知見が得られた。

a) 前浜砂の土粒子密度が侵食に及ぼす影響：図-5より前浜砂の土粒子密度が大きいほど、侵食速度が速いこと、また、前浜砂を設置しない場合、模型崖はほとんど侵食されないことがわかった。このことから崖侵食に及ぼす前浜砂の存在の重要性が明らかになった。

b) 前浜砂の粒径の影響：図-6より侵食速度が最も

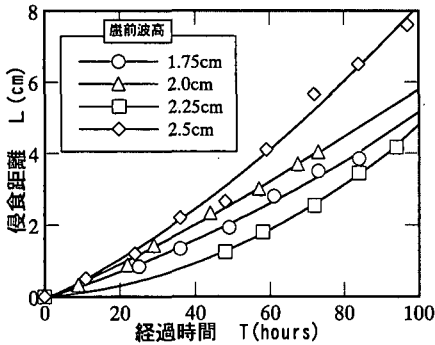


図-8 崖前波高が侵食速度に及ぼす影響

速かった前浜砂は $106 \sim 250 \mu\text{m}$ の粒径幅で構成されたものであった。このことから粒径の違いによる侵食への影響は水中における砂の運動が土粒子の大きさ・質量と関連があることが推測される。

c) 人工崖の初期圧縮強度の影響：図-7 より初期圧縮強度が大きく変化させるほど、侵食速度が遅く変化していくことがわかる。このことより、海岸崖侵食には地盤工学的要因（前浜砂の土粒子密度、粒径、人工崖の強度）が大きく影響を与えていることがわかった。

d) 崖前波高が侵食速度に及ぼす影響：図-8 に示すように崖前波高が大きくなるに従い、侵食速度が速く変化していることがわかる。この原因は波高増大による波圧が大きくなったためと推測される。

以上の実験結果から崖侵食を引き起こす要因として波の特性だけではなく、磨耗材として作用する巻き上げられた前浜砂の物性、および、侵食を受ける崖の強度が侵食速度に大きく影響を与えることが明らかになった。

4. 模型実験結果に基づく崖侵食の予測

これまでに海岸崖侵食の予測に関する研究として、我国で例えば、Sunamura (1982)、真野ら (1996)、金澤ら (1999) によって行われてきている。このうち、著者ら (1999) の予測式は人工崖の磨耗特性を考慮した実験式であった。そこで本研究では模型実験から得られた結果を用いて、侵食予測式の提案を試みた。

4.1 基本となる予測式

模型実験結果から崖侵食予測式を定式化するためには、ある崖海岸での侵食速度とそれぞれの要因の関係を明らかにしておく必要がある。そこで本研究では侵食速度 V はこの3つの要因をパラメータとして次式のような関数形で表わされると仮定する。

侵食速度 $V = f(\text{岩石の強度, 波の圧力 (波力), 海浜堆積砂の密度})$

$$= f_{sc} \times f_p \times f_{\rho s} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 f_{sc} は崖の一軸圧縮強度、 f_p は崖に作用する圧力

(波圧)、 $f_{\rho s}$ は海浜堆積砂密度に関わる関数である。なお、崖に作用する圧力を崖前面での波高で代表させることにした。したがって、本研究では崖に作用する圧力とは波高のことを意味する。

ここで、海岸での基準侵食速度を V_0 とし、また、基準となる崖の一軸圧縮強度 f_{sc0} 、崖に作用する圧力 (波圧) f_{p0} 、海浜堆積砂の密度 $f_{\rho s0}$ とすると式 (1) は以下のように表せる。

$$V_0 = f_{sc0} \cdot f_{p0} \cdot f_{\rho s0} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、3つの変数のうち2つは基準値のまま変化しないと仮定すると、式 (1)、(2) より、各要因における侵食速度変化率 V/V_0 は、それぞれの変数の変化率の関数 g_{sc} 、 g_p 、 $g_{\rho s}$ として次式のように表せる。

$$\left(\frac{V}{V_0}\right)_{sc} = \frac{f_{sc}}{f_{sc0}} = g_{sc} \quad \dots\dots\dots (3a)$$

$$\left(\frac{V}{V_0}\right)_p = \frac{f_p}{f_{p0}} = g_p \quad \dots\dots\dots (3b)$$

$$\left(\frac{V}{V_0}\right)_{\rho s} = \frac{f_{\rho s}}{f_{\rho s0}} = g_{\rho s} \quad \dots\dots\dots (3c)$$

以上の式より、ある崖海岸での侵食速度の予測式として、基準侵食速度 V_0 と3つの変数のそれぞれの変化率の関数 g_{sc} 、 g_p 、 $g_{\rho s}$ を用いた次式が求められる。

$$\begin{aligned} V &= f_p \cdot f_{sc} \cdot f_{\rho s} \\ &= g_{sc} \cdot f_{sc0} \cdot g_p \cdot f_{p0} \cdot g_{\rho s} \cdot f_{\rho s0} \\ &= g_{sc} \cdot g_p \cdot g_{\rho s} \cdot f_{sc0} \cdot f_{p0} \cdot f_{\rho s0} \\ &= g_{sc} \cdot g_p \cdot g_{\rho s} \cdot V_0 \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

4.2 模型実験から得られた関係式

2.2 で説明した実験条件にうち、実験 1, 3, 4 から得られた結果を基に、それぞれの要因の変化率 S_c/S_{c0} ($=g_{sc}$)、 p/p_0 ($=g_p$)、 ρ_s/ρ_{s0} ($=g_{\rho s}$) と侵食速度変化率 V/V_0 の関係をプロットした結果を図-9~11 に示している。これら結果より、3つの要因に関し、それぞれの要因の変化率と侵食速度変化率の関係はユニークな曲線で表せることがわかる。したがって、それぞれの要因の変化率と侵食速度変化率の関係は次式のように近似できる。

$$\left(\frac{V}{V_0}\right)_{sc} = \exp\left\{-1.35\left(\frac{S_c}{S_{c0}}\right) - 1\right\} = g_{sc} \quad \dots\dots\dots (5a)$$

$$\left(\frac{V}{V_0}\right)_p = \exp\left\{3.33\left(\frac{p}{p_0} - 1\right)\right\} = g_p \quad \dots\dots\dots (5b)$$

$$\left(\frac{V}{V_0}\right)_{\rho s} = \exp\left\{5.73\left(\frac{\rho_s}{\rho_{s0}} - 1\right)\right\} = g_{\rho s} \quad \dots\dots\dots (5c)$$

ここで、 V ：侵食速度、 S_c ：崖の一軸圧縮強度、 p ：崖に作用する圧力 (波圧)、 ρ_s ：海浜堆積砂の土粒子密度である。また、添字 0 はそれぞれの要因における基準となる値であることを示している。

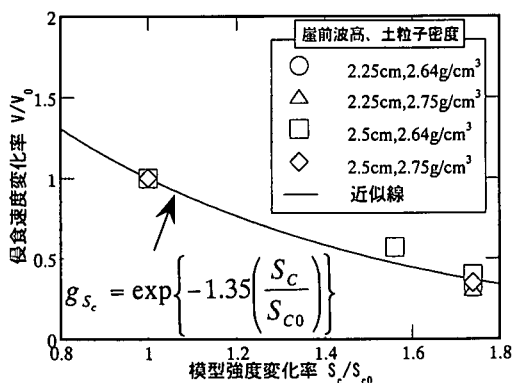


図-9 模型強度変化率と侵食速度変化率の関係

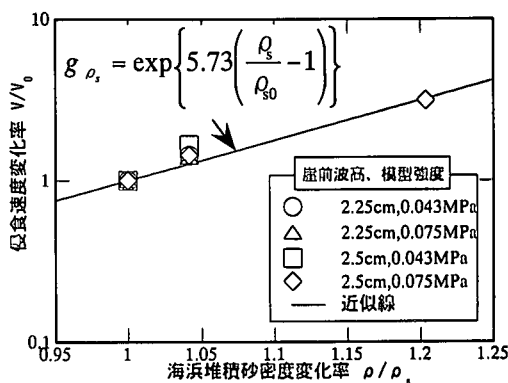


図-11 海浜堆積砂密度変化率と侵食速度変化率の関係

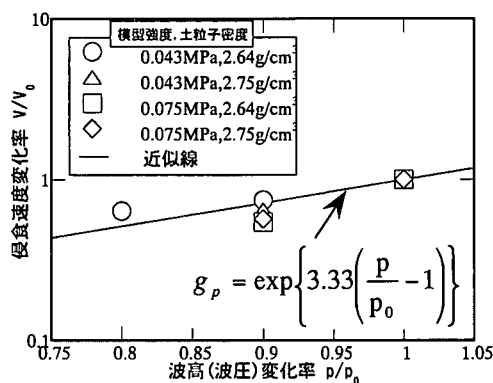


図-10 圧力変化率と侵食速度変化率の関係

4.3 提案する予測式

基本となる予測式(4)と模型実験から得られたそれぞれの要因の関係式(5a), (5b), (5c)から, 侵食速度 V の予測式は, 次のように表される.

$$V = g_{S_c} \cdot g_p \cdot g_{\rho_s} \cdot V_0 \\ = \left[\exp \left\{ -1.35 \left(\frac{S_c}{S_{c0}} - 1 \right) \right\} \right] \cdot \left[\exp \left\{ 3.33 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right) \right\} \right] \\ \cdot \left[\exp \left\{ 5.73 \left(\frac{\rho_s}{\rho_{s0}} - 1 \right) \right\} \right] \cdot V_0 \dots\dots\dots (6)$$

ここで, V_0 : 基準となる侵食速度, S_c : 崖の一軸圧縮強度, p : 崖に作用する圧力(波圧), ρ_s : 海浜堆積砂の土粒

子密度である. この式(6)が本研究で提案された新たな予測式である.

5. 予測式の現地データへの適用

4.で得られた侵食速度評価式の妥当性を検証するために, 現地における海岸崖侵食に適用して予測を行なった. 予測を行なう海岸のパラメータの値を表-1に示している. まず, 予測をする上で必要となる基準となる侵食速度 V_0 と要因ごとの基準値, 崖の圧縮強度 S_{c0} , 波の圧力 p_0 , 海浜堆積砂の密度 ρ_{s0} である. 本研究では, これらの基準値はそれぞれ得られたパラメータを平均しその値をそれぞれの基準値とした. また, 侵食速度の基準値 V_0 は式(4)に各海岸の実測で得られた侵食速度 V とその実験時のパラメータを代入し, 逆算することにより求めた. そして, 算出した海岸ごとの基準侵食速度の平均値を基準侵食速度 V_0 とした. 以上のように算出した各パラメータの平均値と基準侵食速度を表-2に示している. 次に, 表-2のパラメータを用いて, 模型実験から得られた予測式に代入を行ない, 式(7)を得た.

$$V = \exp(-0.62S_c + 5.20p + 2.19\rho_s - 7.17) \dots\dots\dots (7)$$

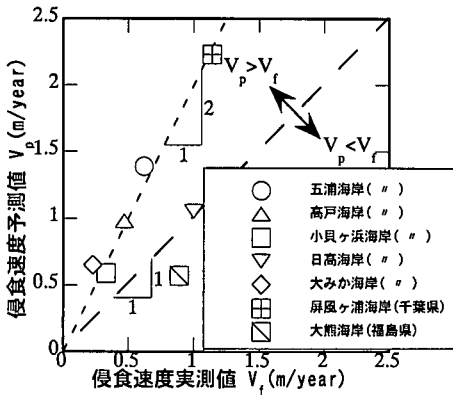
実際の侵食速度との対応を調べたその結果を示したものが図-12である. また, 前報(1999)で提案した磨耗試験から得られた予測式を用いて実際の侵食速度との対応を調べたその結果を示したものが図-13である.

表-1 海岸における特性

崖海岸名	現地侵食速度 (m/year)	岩石の極類	圧縮強度 (MPa)	作用圧力 崖前波高で代表(m)	海浜堆積密度 (g/cm³)
五浦海岸	0.62	泥質砂岩	1.42	0.625	2.59
高戸海岸	0.47	泥岩	2.01	0.625	2.60
小貝ヶ浜海岸	0.33	泥岩	2.97	0.625	2.64
日高海岸	1.00	泥岩	2.08	0.625	2.65
大みか海岸	0.23	泥岩	2.67	0.625	2.60
屏風ヶ浦海岸	1.14	泥岩	1.46	0.70	2.64
大熊海岸	0.89	泥岩	3.25	0.65	2.64

表一2 予測におけるパラメータと侵食速度の基準値

基準圧縮強度 S_{co}	2.17 MPa
基準圧力 (崖前波高) p_0	0.64 m
基準海浜堆積密度 ρ_{so}	2.62 g/cm ³
基準侵食速度 V_0	0.61 m/year

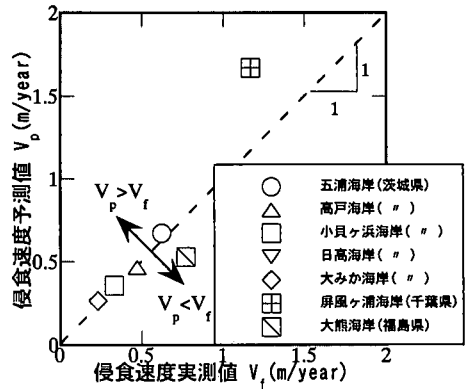


図一12 実測値と本研究による計算値の対応

図一12の結果から模型実験に基づいて提案された予測式と実際の海岸において測定された侵食速度の実測値は、若干、予測値の方が過大評価になっていることがわかる。一方、図一13の結果は全体的に良い対応となっている。このことから崖模型実験より得られた予測式においても実際の海岸の侵食速度を予測することは可能であると考えられる。

6. ま と め

本研究において、海岸崖侵食の主たる要因の把握のため、砂・セメント混合による人工模型崖の圧縮強度、及び、前浜砂の土粒子密度、崖前波高に着目した二次元造波水路実験を行ない、得られた結果を用いて侵食予測式の提案を行なった。次いで、提案式による予測値と、現



図一13 実測値と既報の予測法による計算値の対応

地の崖海岸における侵食速度の比較を行なった結果、予測式は現地における侵食速度をある程度予測できることがわかった。

謝辞：本研究の一部は、茨城県土木部河川課および高萩土木事務所のご協力による所が大きい。付記して、謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 金澤浩明・安原一哉・村上 哲・佐々木康子 (1999): 海岸崖侵食の要因としての人工軟岩の磨耗特性とその定式化, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 1231-1235.
- 真野 明・鈴木成典 (1996): 福島海岸における波浪と海蝕崖の応答解析, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 561-565.
- 佐々木康子・安原一哉・宮崎数礼・村上 哲 (1995): 茨城県北部海岸における海岸崖侵食特性, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 541-545.
- 堀川清司・砂村継夫 (1968): 海蝕崖の侵食に関する実験的研究, 第15回海岸工学講演会論文集, pp. 149-157.
- Sunamura, T. (1982): A predictive model for wave-induced cliff erosion, with application to Pacific Coast of Japan, Jour. Geology, 90, pp. 167-178.