

海岸崖侵食の要因としての人工軟岩の摩耗特性とその定式化

佐々木康子*・金澤浩明**・安原一哉***・村上 哲****

1. まえがき

佐々木 (1995) は既報において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について報告を行なった。この中で、崖侵食は砂と海水の混相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が新しい知見であった (図-1 参照)。先の調査を行なった後、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。次いで、得られた結果を用いて侵食距離を予測する形に定式化を行なった。また、二次元造波水路を用いた人工崖の侵食実験結果によって、摩耗試験から得られた予測式の妥当性の検証を行った。

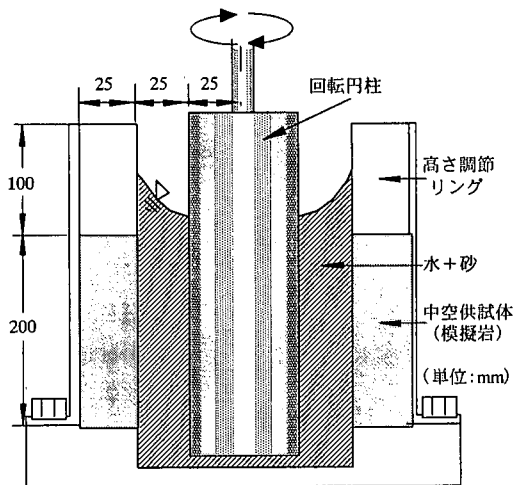


図-2 摩耗特性を調べるための実験装置の概要

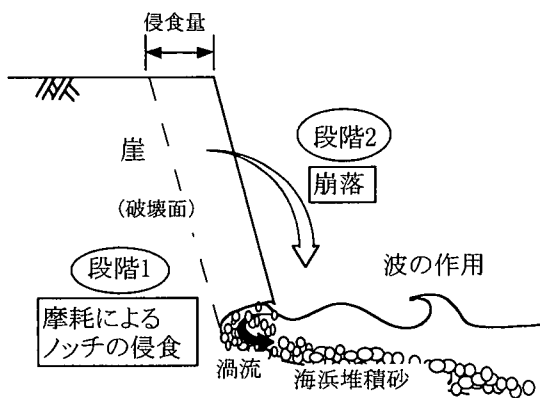


図-1 海岸侵食のメカニズムに関する模式図

2. 人工軟岩の摩耗試験

(1) 実験装置

摩耗現象によってノッチが形成される要因とそのメカニズムを明らかにするため、澤井ら (1979) による内筒

回転式土壌侵食試験法を参考にし、本研究室で試験機を作成した。図-2 に実験装置の概要を示す。試験手順の概略は以下の通りである。

- 実験条件に合わせて配合を行なった中空円筒状の人工軟岩 (砂、水と早強ポルトランドセメントを混合した固結砂) を設置する。
- 中空供試体の中に水 (1500 cm³) と豊浦標準砂 (密度 2.64 g/cm³) を投入し、中央の円柱を回転することによって摩耗現象を再現する。回転速度は試験機上部にセットされた可変速度制御モーターによって制御する。
- 所定の時間を回転させた後、シリンダー内の混相体の体積変化から侵食量の計算を行う。

(2) 実験条件

砂が崖を切り取る摩耗現象は、崖の岩石の強度、前浜砂の密度、波の作用力が複雑に絡み合って引き起こされると考えられる。そこで、本研究では崖の岩石の強度、前浜砂の密度、波の作用力のそれぞれの要因を変化させた実験を行ない、摩耗に及ぼす影響について調べた。以下に試験条件を示す。

- 実験 1 : 岩石の強度が摩耗に及ぼす影響をしらべるため、岩石モデルの配合を早強ポルトランドセメント : 豊浦標準砂 : 水を重量比で 0.5 : 100 : 30, 1 : 100 :

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

表一 試験条件

供試体強度 (MPa)	堆積砂密度 (g/cm ³)	水圧 (MPa)	投入砂量 (水に対し) (%)
0.009	2.64	0.071	2.5
0.020			
0.029			
0.043			
供試体強度 (MPa)	堆積砂密度 (g/cm ³)	水圧 (MPa)	投入砂量 (水に対し) (%)
0.029	2.64	0.041	2.5
		0.071	
		0.11	
		0.16	
		0.21	
供試体強度 (MPa)	堆積砂密度 (g/cm ³)	水圧 (MPa)	投入砂量 (水に対し) (%)
0.009	2.64	0.071	2.5
	2.70		
	2.75		

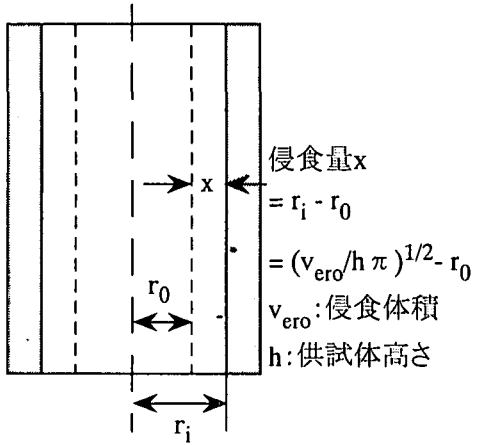


図-3 侵食量の定義

3. 摩耗試験結果とその定式化

これまでに海岸崖侵食の予測に関する研究が、Sunamura (1982), 宮崎 (1995), 佐々木 (1996), 鈴木他 (1996) によって行われてきている。しかし、これまでの予測式は崖の強度と波高、崖の強度のみ、または崖の強度と海浜堆積砂の密度を考慮しているが、上記の3つの要因を考慮した予測式の提案は成されていない。そこで本研究では摩耗実験から得られた結果を用いて、新たな侵食予測式の提案を試みた。

(1) 基本となる予測式

予測式を立てるために、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する必要がある。そこで本研究では崖の侵食速度Vは、次式で表されるものとして考えた。

$$V = f(\text{岩石の強度, 波の圧力 (波力), 海浜堆積砂の密度}) = f_{sc} \cdot f_p \cdot f_{ps} \dots \dots \dots (1)$$

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_{ps} 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_{ps0} とすると式(1)は以下のように表わせる。

$$V_0 = f_{sc0} \cdot f_{p0} \cdot f_{ps0} \dots \dots \dots (2)$$

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_{ps} として次式のように表せる。

30, 1.5 : 100 : 30, 2 : 100 : 30 の割合で配合し実験を行った。このときの人工軟岩供試体の圧縮強度は 0.009, 0.02, 0.029, 0.043 MPa で、波の作用力は回転数 1000 rpm で水圧 0.071 MPa に統一した。このときに投入した砂の密度は 2.64 g/cm³ とした。

b) 実験 2 : 前浜砂の密度が摩耗に及ぼす影響を調べるため、投入する砂は豊浦標準砂に砂鉄を重量比で 0, 5, 10% と変化させ、砂の密度を 2.64, 2.70, 2.75 g/cm³ とした。また岩石モデルの配合は早強ポルトランドセメント : 豊浦標準砂 : 水を重量比で 1.5 : 100 : 30 で、圧縮強度を 0.043 MPa に、波の作用力は回転数 1000 rpm で水圧 0.071 MPa に統一した。

c) 実験 3 : 波の作用力が摩耗に及ぼす影響を調べるため、モーター回転数 750, 1000, 1250, 1500, 1750 rpm のもとで波の作用力(水圧)を 0.041, 0.071, 0.11, 0.16, 0.21 MPa 発生させた。岩石モデルの配合は早強ポルトランドセメント : 豊浦標準砂 : 水を重量比で 1.5 : 100 : 30 で、圧縮強度を 0.043 MPa に統一し、このときに投入した砂の密度は 2.64 g/cm³ とした。なおいずれの試験においても砂の投入量は水の量との体積比で 2.5% とした。表一は実験条件をまとめたものである。

(3) 侵食距離の定義

本研究では、侵食距離 (cm³/cm²) は“侵食体積 (cm³) / 侵食を受ける面積 (cm²)”と定義した。この侵食距離の定義を図-3 に示す。測定のたびに摩耗試験によって削られた内容物を取り出し、その後モールド内に水を満たすことにより侵食体積を測定することによって、侵食量を求めた。

$$\left(\frac{V}{V_0}\right)_{sc} = \frac{f_{sc} \cdot f_p \cdot f_{ps}}{f_{sc0} \cdot f_{p0} \cdot f_{ps0}} = g_{sc} \dots\dots\dots (3a)$$

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

$$\left(\frac{V}{V_0}\right)_{ps} = \frac{f_{ps}}{f_{ps0}} = g_{ps} \dots\dots\dots (3c)$$

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_{ps} を用いた次式が求められる。

$$\begin{aligned} V &= f_p \cdot f_{sc} \cdot f_{ps} \\ &= g_{sc} \cdot f_{sc0} \cdot g_p \cdot f_{p0} \cdot g_{ps} \cdot f_{ps0} \\ &= g_{sc} \cdot g_p \cdot g_{ps} \cdot f_{sc0} \cdot f_{p0} \cdot f_{ps0} \\ &= g_{sc} \cdot g_p \cdot g_{ps} \cdot V_0 \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

(2) 摩耗実験から得られた関係式

2の(2)で説明した実験条件において回転摩耗実験を行ない、得られた結果を基に、それぞれの要因の変化率 S_c/S_{c0} , ρ/ρ_0 , p/p_0 と侵食速度変化率 V/V_0 の関係をプ

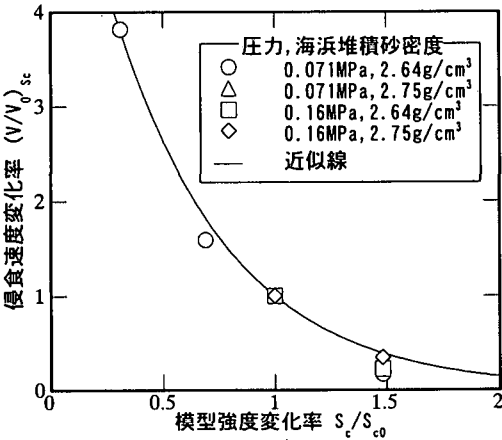


図-4 模型強度変化率と侵食速度変化率の関係

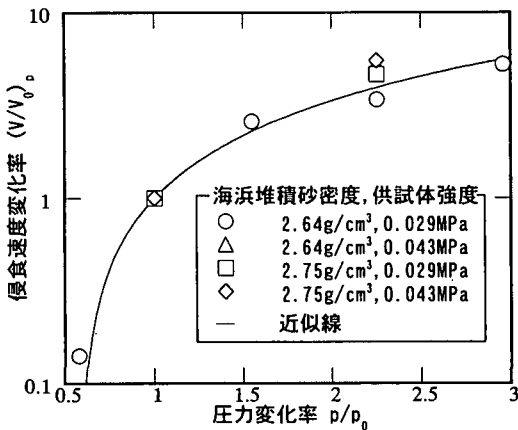


図-5 圧力変化率と侵食速度変化率の関係

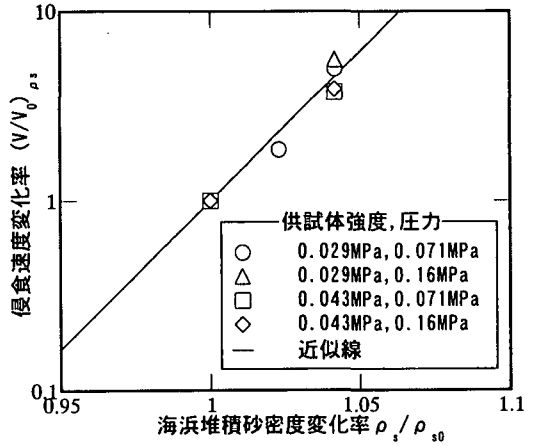


図-6 海浜堆積砂密度変化率と侵食速度変化率の関係

ロットしたものを図-4~6に示す。また、これらの図より、3つの要因に関し、どのような条件においても要因の変化率と侵食速度変化率の関係は同じ一本の線で表せることがわかる。したがって、このような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。

$$\left(\frac{V}{V_0}\right)_{sc} = \exp\left\{-1.94\left(\frac{S_c}{S_{c0}}\right) - 1\right\} = g_{sc} \dots\dots\dots (5a)$$

$$\left(\frac{V}{V_0}\right)_p = 2.35\left(\frac{p}{p_0} - 1\right) + 1 = g_p \dots\dots\dots (5b)$$

$$\left(\frac{V}{V_0}\right)_{ps} = \exp\left\{36.2\left(\frac{\rho_s}{\rho_{s0}} - 1\right)\right\} = g_{ps} \dots\dots\dots (5c)$$

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。

(3) 予測式の提案

基本となる予測式(4)と摩耗実験から得られたそれぞれの要因の関係式(5a), (5b), (5c)から、摩耗に着目した侵食速度 V の予測式は、次のように表される。

$$\begin{aligned} V &= g_{sc} \cdot g_p \cdot g_{ps} \cdot V_0 \\ &= \left[\exp\left\{-1.94\left(\frac{S_c}{S_{c0}} - 1\right)\right\}\right] \cdot \left[2.35\left(\frac{p}{p_0} - 1\right) + 1\right] \\ &\quad \cdot \left[\exp\left\{36.2\left(\frac{\rho_s}{\rho_{s0}} - 1\right)\right\}\right] \cdot V_0 \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

ここで、 V_0 : 基準となる侵食速度である。この式(6)が、式(4)を具体的に表現するために本研究で得られた崖の強度、崖に作用する波の圧力(波圧)、海浜堆積砂を考慮できる新たな予測式である。

4. 摩耗特性を考慮した侵食予測式とその適用性

3. で得られた侵食速度評価式の妥当性を検証するた

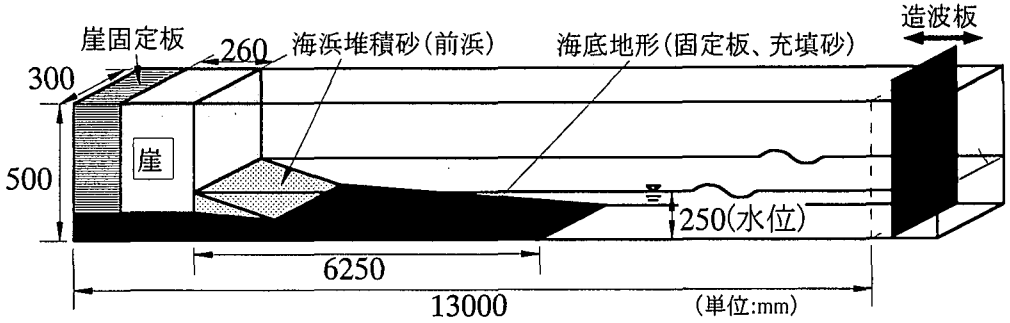


図-7 二次元海水路模型実験の概要図

めに、茨城大学でこれまで行なってきた二次元造波水路を用いた崖侵食模型実験(図-7参照)を行ない、回転摩耗実験から得られた予測式を用いて模型試験結果との比較を行なった。まず、予測をする上で必要な基準となるパラメータは、崖の圧縮強度 S_{co} 、波の圧力 p_0 、海浜堆積砂の密度 ρ_s であるが、本研究では佐々木(1997)が行なった15本の崖侵食模型実験より得られたそれぞれのパラメータの平均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 はそれぞれの模型実験で得られた侵食速度 V とその実験時のパラメータを式(4)に代入し、

表-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}	0.087 MPa
基準圧力(崖前波高) p_0	2.43 cm
基準海浜堆積砂密度 ρ_s	2.69 g/cm ³
基準侵食速度 V_0	0.12 m/year

逆算することにより求め、各模型実験ごとの平均値を基準侵食速度 V_0 とした。以上の過程で算出した各パラメータの平均値と基準侵食速度を表-2に示す。

次いで、表-2のパラメータを、摩耗実験から得られた予測式(6)に代入して、計算による予測値と崖模型試験による実測値の対応を調べさせた結果が図-8である。

この図より、摩耗試験から提案した予測式から求めた予測値は、やや実験値を若干過大評価する傾向があるが、全体的に良い対応となっている。このことから室内回転摩耗実験結果を定式化して得られた計算式を用いることによって崖模型実験の侵食量のある程度予測することは可能であることがわかる。

5. まとめ

本研究では、崖侵食の要因の1つであると考えられるアブレーション摩耗現象を再現するために、人工軟岩に対する回転摩耗実験を、模型強度、水圧、海浜堆積密度に着目した実験を行ない、得られた結果から崖侵食予測式を提案した。次いで、二次元造波水路による侵食実験から得られた侵食速度と、提案式による計算侵食速度とを比較することによって、提案式が崖侵食の予測に有用であることを明らかにした。

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援助・ご協力によるところが大きい。付記して、敬意を表する次第である。

参考文献

佐々木康子 (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.
 佐々木康子 (1996): 海岸崖侵食に及ぼすアブレーションの影響, 第51回年次学術講演会講演概要集, III-A, pp. 702-703.
 佐々木康子 (1997): アブレーションに着目した海岸崖侵食の予測, 平成8年度茨城大学大学院修士論文, pp. 84-130.
 澤井健二・芦田和男 (1979): 内筒回転式土壌侵食試験法について, 京都防災研究所年報, 第22号, B-2, pp. 291-300.

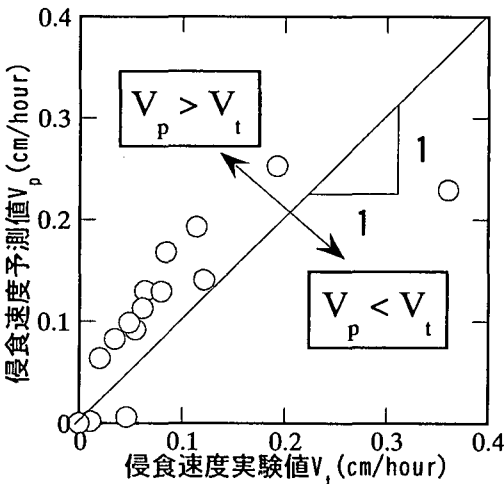


図-8 二次元海水路模型実験による実測値と計算による予測値の対応

鈴木成典・真野 明 (1996): 福島海岸における波浪と海食崖における波浪と海食崖の応答解析, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 561-565.

宮崎数礼 (1995): 海岸崖侵食における崖の圧縮強度と侵食速度の関係, 第 50 回年次学術講演会講演概要集, III-A, pp. 670-

671.

Sunamura, T. (1982): A predictive model for wave-induced cliff erosion, with application to Pacific coast of Japan, *Jour. Geology*, 90, pp. 167-178.
