

高潮時に生じる海浜侵食と回復過程

西隆 一郎*・佐藤 道郎**・中村 和夫***

1. まえがき

通常、季節的な海浜変形において高波浪により侵食された前浜部は、平常の穏やかな波浪条件下で卓越する岸向き漂砂により回復される。このような海岸過程は、暴風海浜、平常海浜と呼ばれる波作用に対する海浜の動的応答特性として知られる。暴浪時の観測の困難さのために、現地海浜で定量的にこの現象について調べることは行ないがたかったが、最近になっていくつかの観測の試みが成されるようになってきた(例えば、河田ら, 1988)。実験室内では、既に砂村、倉田(1981)により、時間的に波形勾配の変わる波を用いて、この様なビーチサイクルの再現が行われている。

ところで、実際の海浜では、平常時、暴浪時といった入射波の平均特性の変動に加え、特に、暴浪時には高潮やモンスーンの吹き寄せによる平均水位の上昇が考えられる(宮崎, 1954, 1956; Dube *et al.*, 1986)。潮汐のような水位変動と海浜変形については服部ら(1981)により、またかなり長期的な海水準の変動と海浜地形の関係については Per Brun (1983) により研究が成されている。

本研究においては、高潮による平均水位の上昇を伴う高波浪が海浜に來襲する場合の海浜変形について検討を行う。つまり、高潮による平均水位上昇とこの水位の上を進む高波浪により平常時の波では遡上不可能な地点まで高波浪による侵食欠潰が進み、平常時の波では侵食部の回復が成されないまま新たなビーチサイクルが始まることが考えられた。このような高潮を伴う場合の侵食については、既に Graaff (1977) により実験が行われているが、その研究においては、高潮災害を防ぐための Dune の設計に対する侵食量の算定に主眼が置かれ、それに引き続く平常時の波による海浜の回復過程についての実験や検討は成されていない。また、ハリケーンを対象とした Dune 侵食に対する数値実験も Kriebel (1982)

により試みられている。

現地における被災例も宇多(1988 a) により報告されており高潮を伴う高波浪による海浜侵食とそれに引き続く平常の波による回復過程について検討することは災害防止、復旧の観点からも重要と考えられた。

2. 実験条件

実験は、図-1 に示す実験水路内に中央粒径が 0.2 mm の豊浦標準砂を用いて一様海浜模型を設置した。ビーチサイクルに与える初期海浜断面の影響を調べるため、実験においてはこの一様海浜に 1 時間の平常波を作らせ得られた地形を初期断面として用いる実験シリーズ A と、一様海浜を初期断面として用いる実験シリーズ B を行った。

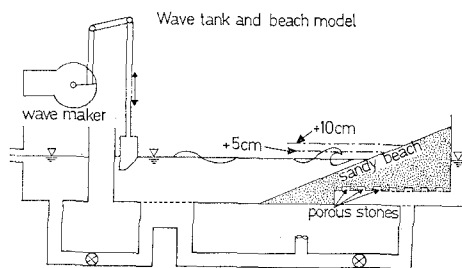


図-1 実験水路図

この初期海浜断面に平均水位の上昇を伴う高波浪を 1 時間作用させ、その後、水位を元に戻し平常時の波を 7 時間作用させるサイクルを 3 回繰り返す。波浪条件は、波形勾配をコントロールすることにより決定した。表-1 に用いた波浪条件を示す。ただし、実験シリーズ B については、実験シリーズ A とほぼ同じ条件であるためにケース番号に 9 を足したものがそれぞれ対応している。図-2 に、2 つの実験シリーズにおける波浪条件の経時変化を模式的に示す。

通常、水位上昇量 $\Delta\eta$ (cm) は次式で表される(柳島ほか, 1988)。

$$\Delta\eta = a \cdot \Delta p + b \cdot u^2 \cos \theta + \eta_{\max}(\text{wave}) \dots (1)$$

* 正会員 工修 鹿児島大学助手 工学部海洋土木開発工学科
 ** 正会員 工博 鹿児島大学教授 工学部海洋土木開発工学科
 *** 正会員 鹿児島大学技官 工学部海洋土木開発工学科

表-1 実験条件

WAVE CASE	HEIGHT H_0 cm	PERIOD T sec	DEPTH h cm	STEEPNESS H_0/L_0	C VALUE	CRITICAL DEPTH h_c cm	TYPE
1	4.12	2.0	20	0.0152	4.8	4.9	NORMAL WAVES STORM WAVES
	6.53	1.0	20	0.0653	9.9	7.9	
2	2.9	1.5	20	0.0144	3.7	3.1	NORMAL WAVES STORM WAVES
	7.0	1.0	20	0.0581	10.7	8.6	
3	3.3	1.0	20	0.0268	4.9	3.2	NORMAL WAVES STORM WAVES
	6.5	1.0	20	0.0540	9.9	7.9	
4	2.3	2.0	20	0.0086	2.7	2.9	NORMAL WAVES STORM WAVES
	5.9	1.0	30	0.0431	8.6	7.0	
5	2.6	1.5	20	0.0131	3.3	2.6	NORMAL WAVES STORM WAVES
	5.9	1.0	30	0.0429	8.6	6.8	
6	3.2	1.0	20	0.0266	4.9	3.1	NORMAL WAVES STORM WAVES
	5.9	1.0	30	0.0427	8.5	6.8	
7	2.4	2.0	20	0.0090	2.8	2.9	NORMAL WAVES STORM WAVES
	7.3	1.0	25	0.0563	10.9	9.1	
8	2.9	1.5	20	0.0144	3.7	3.1	NORMAL WAVES STORM WAVES
	7.1	1.0	25	0.0553	10.7	8.3	
9	3.1	1.0	20	0.0259	4.8	3.0	NORMAL WAVES STORM WAVES
	6.8	1.0	25	0.0524	10.1	8.3	

本実験では簡単化のために、高波浪と同時に用いる高潮に相当する平均水位上昇量は 0 cm, 5 cm, 10 cm とした。高波浪時に平均水位の上昇を加えないもの、つまり、高波浪作用時、平常の波作用時で水位を同じにしたものは通常の季節的なビーチサイクルの現象を調べたことを目的とし、高波浪時に 5 cm の平均水位上昇を加えたものは、通常天文潮による最大潮位あるいは、前浜頂部（バーム）の高さに相当するものである。また高波浪時に 10 cm の平均水位上昇量を用いたものは、天文潮に吹き寄せ吸い上げ等の気象潮が重なった場合を想定した。入射波浪の波特性による回復過程の相違を調べたことを含め、実験は18ケース行った。

実験においては1時間毎に造波機を停止させ、2 cm おきにポイントゲージを用いて断面形状を読み取り、同

時に汀線位置の計測も行った。入射波浪は、1時間毎の造波開始時に容量式波高計で測定した。これらのデータにより一時間平均の岸沖漂砂量、地形変化の分布を求めた。また、海浜侵食部の回復過程を示す指標（砂村, 1980; 宇多ほか, 1988 b）として、汀線位置と汀線上部の砂量の経時変化を用い、高潮を伴う高波浪により侵食を受けた海浜の回復過程を検討した。

3. 実験結果

高潮を伴う高波浪の作用により生じた侵食海浜の回復過程について見るために、まずそれぞれのケースの最終海浜断面を示す。次いで、侵食、回復過程の指標としての汀線位置と、汀線上部の砂量の経時変化について述べる。また、侵食海浜の回復が起きた場合と、起きなかった場合の経時的な岸沖漂砂量分布について述べる。

3.1 最終海浜断面

図-3 に、それぞれのケースにおける、3サイクルの波作用後の最終海浜断面を示す。高波浪時に平均水位の上昇を加えないケース 1, 2, 10, 11の場合、最初の高波浪作用時の断面形状に関係なく高波浪により侵食が起こり、それに引き続く平常時の波により海浜侵食部の回復が起こる通常のビーチサイクルとなる。ただし、前浜部への砂の堆積量は一樣斜面に高波浪から作用させた場合の方が少ない。これは、高波浪の作用時における、バームの存在の有無が原因である。ケース 3 と12では、平常時の波において海浜の回復が起きていない。これは平

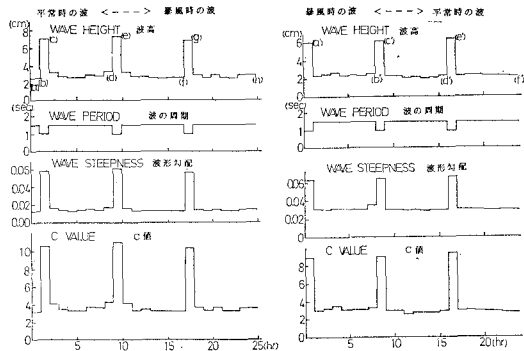


図-2 波条件の経時変化

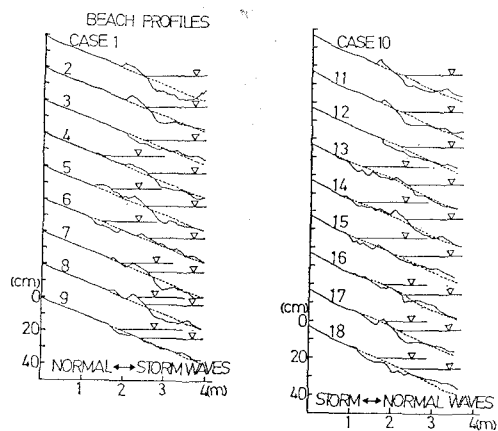


図-3 最終海浜断面

への砂の堆積を促す。また碎波した高波浪が侵食性の波であっても、前浜の侵食量は小さい。これは一様海浜に高波浪から作用させた実験シリーズBの場合と対称的な結果となる。一様斜面に高波浪から作用させた実験シリーズBの場合では、高波浪による侵食が上昇した平均水位の下で前浜の上部に及ぶ。これに続く平常時の波の週上は、侵食された上部海浜まで到達しないために、平常時の波による回復も前浜上部では起こらず、汀線付近で砂の堆積が起こるだけの、ビーチサイクルが続く。平均水位 5 cm の上昇を高波浪作用時に用いたケース 7 から 9、ケース 16 から 18 は、ほぼ 10 cm の平均水位上昇を加えた場合と同様の傾向を示す。これらの結果より、幅広い前浜（バーム）は侵食を防ぐあるいはその侵食量を抑制する上で、効果的手法になることが予測される。また、高潮を伴う高波浪による海浜上部の侵食が起きた場合には、平常の波週上による岸向き漂砂による回復が生じにくいので、人工的に砂を補給する必要性が考えられる。

次に、実験ケースの中から侵食部の回復の起きた場合と起きなかった場合の代表的な例について、各サイクル毎の経時変化を図-4 に示す。ケース 2 の場合では、バームの発達した地形に高波浪が作用し侵食性の海浜を造るが、それが引き続く 7 時間の波により回復されるといいう海浜の季節的変化を表す。

3.2 汀線変動

最終海浜断面に基づき、高潮時に生じた侵食部の大きな回復過程について述べてきたが、実際、海浜が侵食されているのか、堆積しているのかを定量的に示すものとして汀線位置の変動が考えられる。汀線が前進すれば堆積、後退すれば侵食としてとらえられる。

図-5 に、実験シリーズAとBの、ケース 1 から 6、10 から 15 の場合の汀線変動を示す。それぞれ平均水位の上昇量として 5 cm を用いたものは、ほぼ 10 cm の平均水位上昇量を用いたものと類似の傾向を示したため省いてある。

実験シリーズA、Bとも、高波浪作用時に平均水位の上昇量を加えないケース 1、2、10、11 で、平常の波作用時に汀線の前進が、高波浪作用時には後退が明瞭に現れ、その変動量は 20 cm 程度である。また、侵食に引き続く回復過程において、ほぼ最初の 1 時間の平常の波作用時に大体の汀線の変動が進んでおり、それに引き続く 6 時間の汀線変動はほとんどみられず、あってもかなり小さい。これは岸漂砂量の経時的な分布とも同じ傾向を示す。高波浪の作用に引き続く平常の波作用の最初の 1 時間に汀線の前進が生じないものは、侵食部の回復がみられない。次いで、高波浪時に 10 cm の平均水位上昇を加えたケース 4、5、13、14 について考察する。高

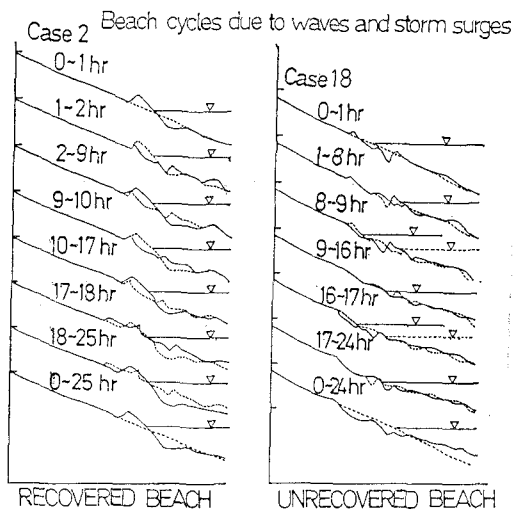


図-4 代表的なビーチサイクルの例

常時の波として用いた波浪の波形勾配が大きかったためである。このケースにおいては通常のビーチサイクルが繰り返されずに、1 サイクル毎に海浜の侵食が進む。

次いで、高波浪時に 10 cm の平均水位の上昇を加えたケース 4 から 6、ケース 13 から 15 について述べる。一様斜面に平常時の波を作用させたため 10 cm の平均水位上昇を伴う高波浪の作用時にバームが発達していたケース 4、5 については最終海浜形状は前浜の発達したものとなっている。これらのケースではまず一様斜面に 1 時間作用させた平常時の波によりバームが形成される。これに続く平均水位の上昇を伴う高波浪の作用下で、この前浜（バーム）が、上昇した平均水位の下でバーとして機能し、沖からやって来る高波浪を碎波させ波エネルギーを消散させる。このため波は、波高の小さい堆積性の波に変えられ、高波時の碎波点付近（平常時におけるバーム頂部付近）から、砂を岸向きに輸送し、海浜上部

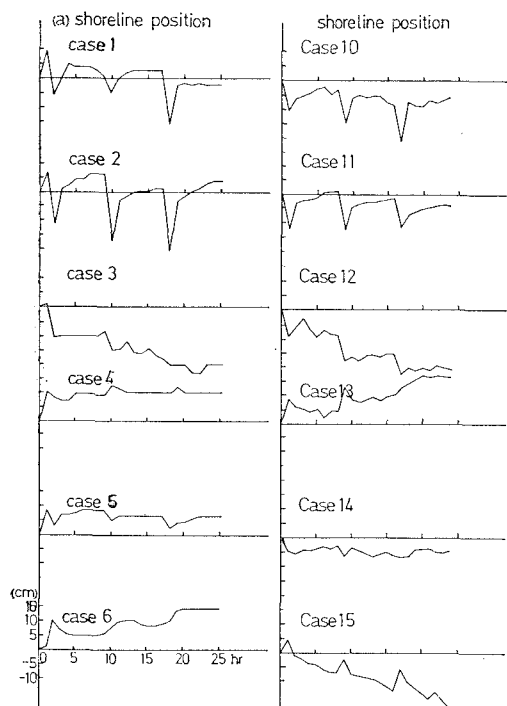


図-5 汀線変動図

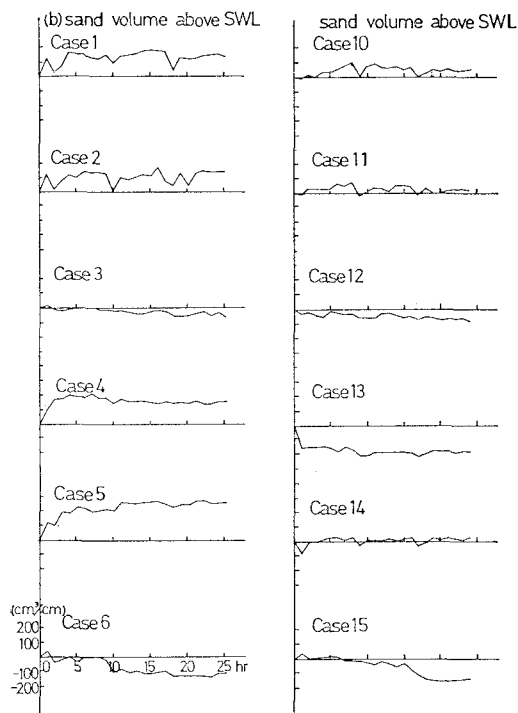


図-6 汀線上の砂量変化

波浪作用時に、バームが存在していたケース4, 5の場合では、高波浪作用時、平常の波作用時に対するサイクリックな汀線変動が表れている。しかし、ケース4では平均水位の上昇を伴う高波浪作用後に汀線の前進がみられる。平均水位上昇を伴う高波浪が作用するときに、バームが存化していないケース13, 14については前記のケースと異なり、サイクリックな汀線変動が明瞭に表れていない。ケース13では平均水位上昇を伴う高波浪作用後に汀線の前進がみられる。これは平均水位を10cm上昇させた条件で高波浪による侵食された底質が、その水位のもとでバーを構成する。その後水位が平常時のものまで下降したときに、このバーが、バームとして機能するために、高波浪の作用にも関わらず汀線が前進する。このような例から、平均水位の上昇を伴う高波浪の作用を受ける場合に、汀線変動はその時点での海浜縦断面形状の影響を強く受け、必ずしもサイクリックな変動を示さないことが分かる。

3.4 汀線上の砂量の変化

2次元的な海浜の侵食堆積状況を示す指標として、汀線上の砂量の経時変化が妥当と思われた。

計測した海浜断面から、1時間毎の汀線上の砂量を求め、図-6に示す。ただし、一樣海浜断面との差として示してある。図-6にケース1から6、ケース10から15を示す。それぞれ高波浪と平常の波作用時で水位を同じにしたケースでは、高波浪作用時に砂量の減少、平常の波作用時に増加がみられる。ただし、その変化量は一樣斜面に平常時の波から作用させた実験シリーズAの方が大きい。高波浪作用時に平均水位の10cmの上昇を加えたケース4, 5, 13, 14では、波浪条件による砂量の減少、増加が現れていない。

通常のビーチサイクルでは、沿岸漂砂を考慮しなければ汀線上の砂量と汀線変動は正の相関を持つと考えられるが、平均水位の大きな上昇が高波浪時に重なる場合には必ずしも汀線変動と、汀線上の砂量は相関を持たない事が分かる。

3.5 岸沖漂砂量

以下に示す連続の式より、岸沖漂砂量の分布を求めた。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{(1-\lambda)} \frac{\partial Q}{\partial x} \quad \dots\dots\dots (2)$$

代表的な例としてケース7と14を図-7に示す。ケース7は平均水位の上昇を加えなかった場合である。一樣海浜断面に最初1時間の平常の波を作用させるときに岸向きの漂砂量が卓越し、引き続き1時間の高波浪作用時にはほぼ同量の沖向き漂砂量が発生している。それに引き続く7時間の平常時の波作用では、ほぼ最初の1時間で高波浪作用時に発生したのとはほぼ同量の岸向き漂砂が同じ位置に発生しており、その後の時間の正味の岸沖漂砂

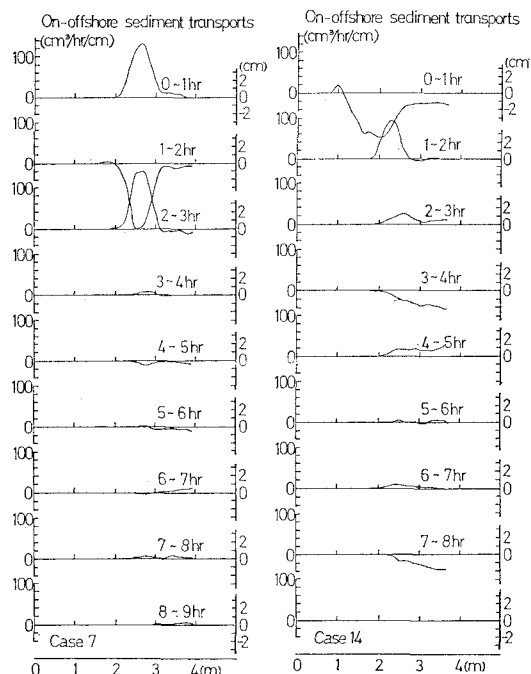


図7 代表的な岸沖漂砂量分布

量はかなり小さく、ほぼ1時間の平常の波作用で平衡断面に近づくことがわかる。ケース14は、高波作用時に平均水位 10 cm の上昇を加え、一様斜面に高波浪から作用させた場合である。最初の高波浪作用時に発生した沖向き漂砂量に対し、引き続き7時間の平常の波による岸向き漂砂量の発生位置は侵食された前浜上部の海浜をカバーしていない。また漂砂量の絶対値も小さく、侵食海浜の回復が起こらない。

4. 結 論

高潮時に侵食された前浜あるいは海浜上部が、それに引き続く平常時の波により回復される過程について、実験的検討を行った。

結論として、平均水位の上昇を伴わないケースでは、最初に平常時の波から作用させた場合でも、高波浪から作用させた場合でも、初期断面形状に関係なく、高波浪により侵食が起こり、それに引き続く平常の波により海浜侵食部への堆積が起こるビーチサイクルとなり、侵食部の回復が起こる。

しかし、高潮を対象とした平均水位の上昇を伴う高波浪を作用させるケースでは、高波浪の作用時の海浜断面形状により、その後のビーチサイクルに差異が生じる。一様勾配斜面に高波浪がまず作用した場合には、引き続き平常の波では回復不可能な侵食が生じるが、平常の波

作用後に、平均水位の上昇を伴う高波浪を作用させた場合には、先に形成されていたバームが水位上昇時に高波浪を砕けさせ、波のエネルギーを消散させるバーとしての役割を果たし、弱められた波は、海浜上部へ底質を輸送、堆積させる。このようなことが生じるためには、十分に広い前浜の存在が前提となる。この結果は、例えば、Shore Protection Manual (1977) に記載されているような、侵食に引き続く平常時の波により前浜の回復が起こるケースと起こらないケースのあることの一つの説明となる。

高潮による平均水位の上昇を伴う高波浪が作用するような海岸過程においては、特に動的な海浜地形と波浪の相互作用が重要であり、単に予測することは難しい。また数値計算でも試みているが、現在のところ良好な結果が得られなかった。

謝辞 本研究の一部は、当時学部4年生であった桐山信一、浜田俊哉、相星憲志諸氏の卒業研究として行った実験でありここに謝意を表します。

参考文献

- 宇多高明 (1988 a): モルディブにおける高潮災害の現地調査, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 212~216.
- 宇多高明・小俣 篤・竹舘 勉 (1988 b): 波による前浜地形変化の支配要因, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 337~341.
- 河田恵昭・吉岡 洋・芹澤重厚 (1988): T型栈橋による高波浪時の海底地形計測法, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 387~391.
- 砂村継夫 (1980): 自然海浜における汀線位置の時間的変化に関する予測モデル, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 225~229.
- 砂村継夫・倉田雄司 (1981): 時間的に変化する波浪を用いた海浜変形に関する二次元実験, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 222~226.
- 服部昌太郎・井崎嘉幸 (1981): 平均水位変動下での岸沖漂砂と海浜地形, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 202~206.
- 宮崎正衛: 風波と高潮について (1954), 第1回海岸工学講演会論文集, pp. 17~21.
- 宮崎正衛 (1956): 近年日本海岸に襲った高潮について, 第3回海岸工学講演会論文集, pp. 1~8.
- 柳嶋慎一・加藤一正・磯上知良・村上裕幸 (1988): 波による汀線付近の水位上昇量に関する現地調査, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 125~127.
- Coastal Engineering Research Center: Shore Protection Manual, Vol. 1, 1977.
- Dube, S. K., P. C. Sinha and G. D. Roy (1986): Numerical simulation of storm surges in bangladesh using a bay-river coupled model, Coastal Engineering, 10, pp. 85~101.
- Graaff, J. V. D. (1977): Dune erosion during a storm surge, Coastal Engineering, 1, (1977) 99~134.
- Kriebel D. L. (1982): Beach and dune response to hurricanes, A thesis for the degree of master of Civil Engineering, University of Delaware
- Per Bruun (1983): Review of conditions for uses of the bruun rule of erosion, Coastal Engineering, pp. 77~89.