

高潮による海浜変形に関する研究

孫 彰 培*・野田英明**・松原雄平***・黒岩正光****

1. 緒 論

台風や低気圧の来襲時の高潮が引き起こす短期的な海浜地形変動は防災上極めて重要な現象であるが、その観測の困難さのため十分に明らかにされていない。

高潮による海浜変形に関する研究は、これまで Kriebel・Dean (1985, 1993) や Kobayasi (1987) による理論的研究および数値計算による研究のほかに、暴浪と海浜回復のビーチサイクルに関する再現実験として、砂村・倉田 (1981) の時間的に変化する波浪を用いた海浜変形に関する実験および西ら (1990) の水位変動を伴う高潮と海浜回復のビーチサイクルの再現実験が行われている。ところが、高潮の来襲時の連続的な水位上昇・低下に伴う海浜の動的応答特性を検討した例は少ない。そこで本研究では、高潮時の水位を段階的に変化させ、海浜の動的応答特性および高潮による地形変化が回復過程に及ぼす影響を実験的に検討する。

さらに、Kriebel・Dean (1993) による汀線後退量算定式の計算結果と模型実験結果を比較することによって理論式の検証を行う。

2. 実験条件および方法

実験は図-1 に示す断面 2 次元波動水槽 (26 m×0.6 m×1.1 m) で行った。水槽の一端には豊浦標準砂 (中央粒径 0.017 cm) で 1/10 勾配の砂床を設置し、規則波で実験を行った。高潮時の平均水位変化は図-2 に示すよう

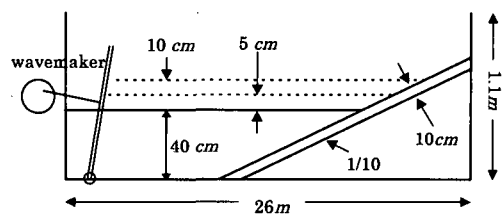


図-1 実験装置

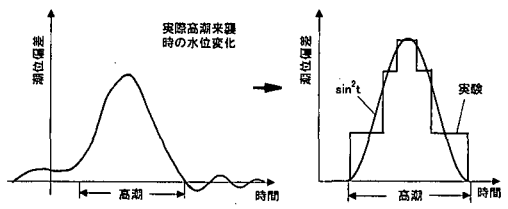


図-2 高潮のモデリング

に実際の水位変化を参考にし、侵食型の波浪条件下で水位を 3 段階で上昇させ、その後再び段階的に水位を元に戻し高潮来襲過程を再現した。続いて平常時の波を 8 時間作用させ、高潮時と平常時の組み合わせで 1 サイクルとし、各実験で 2 サイクルづつとした。高潮に相当する平均水位の最大上昇量は 5 cm, 10 cm に、高潮の作用時間は 40 分, 2 時間, 3 時間として最大水位上昇量および高潮の作用時間が汀線後退に及ぼす影響について調べた。海底地形は光学式砂面計で 2 cm 間隔で測定して移動平均して示した。実験条件は表-1 に示すとおりで、 C は汀線の前進、後退を決めるパラメータ ($C \geq 8$; 前進, $8 \geq C \geq 4$; 前進または後退, $4 \geq C$; 後退) として用いた (堀川ら, 1975)。

また、暴浪によって砂浜から侵食された砂が浅海域に運ばれ、形成されたバーが平常時の波によって徐々に岸方向に移動し、陸上に乗り上げて形成されたバームは次に来襲する暴浪時に侵食を防ぐ機能を持っていること (西ら, 1990) から表-1 には武田・砂村 (1982) のバーム形成条件式 (1) を用いてバーム形成の有無を示した。

$$\left. \begin{aligned} 1 \times 10^{-3} \leq H_b/gT^2 \leq 7 \times 10^{-3} \\ H_b/gT^2 \leq D/H_b \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 H_b は碎波波高、 T は波の周期、 D は底質の平均粒径、 g は重力加速度である。

3. 実験結果

図-3(a)~(d) は上段から各 CASE における平均水位、沖波波形勾配 H_b/L_o 、周期 T 、汀線位置および 2 サイクル目の高潮時における海浜断面地形の時間変化を示したものである。実験結果から各 CASE の 1 および 2 サイ

* 学生会員 鳥取大学大学院 工学部土木工学科
** 正 会 員 工 博 鳥取大学教授 工学部土木工学科
*** 正 会 員 工 博 鳥取大学助教授 工学部土木工学科
**** 正 会 員 工 修 鳥取大学助手 工学部土木工学科

表-1 実験条件

CASE	wave type	H_0/L_0	H_0 (cm)	T (sec)	最大水位上昇量 (cm)	波作用時間	C	バーム形成
1	storm	0.06	9.4	1.0	10	40 min, 2 hr	14.6	×
	normal	0.01	3.5	1.5	0	8 hr	4.2	○
2	storm	0.06	9.4	1.0	5	3 hr	14.6	×
	normal	0.005	3.1	2.0	0	8 hr	3.1	○
3	storm	0.07	10.9	1.0	10	2 hr	17.0	×
	normal	0.005	3.1	2.0	0	8 hr	3.1	○
4	storm	0.045	7.0	1.0	5	3 hr	10.9	×
	normal	0.02	4.5	1.2	0	8 hr	6.2	×

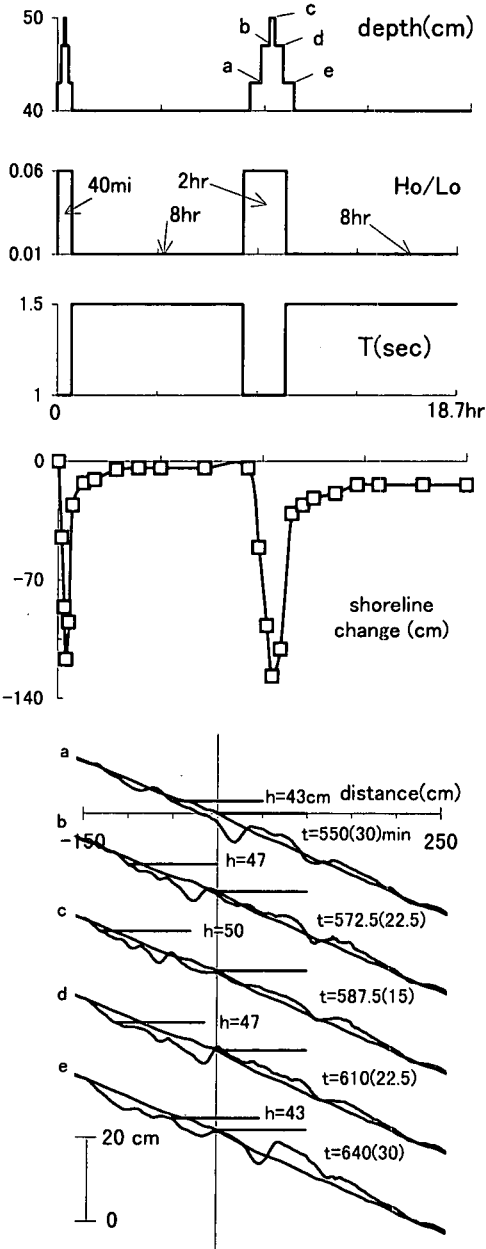


図-3(a) CASE 1 における水位、波浪特性、汀線位置、断面地形の時間変化

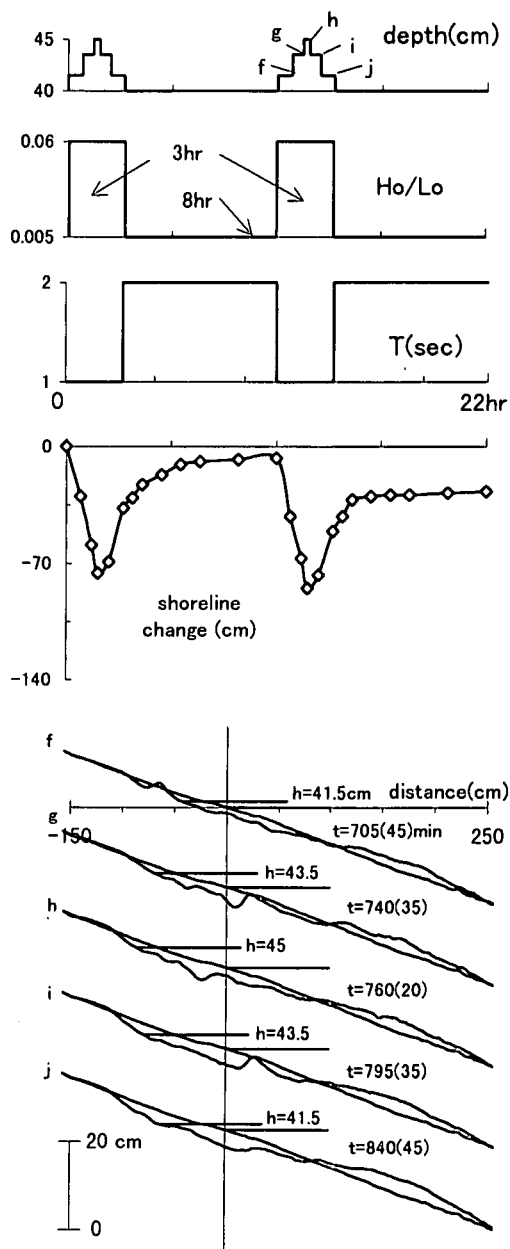


図-3(b) CASE 2 における水位、波浪特性、汀線位置、断面地形の時間変化

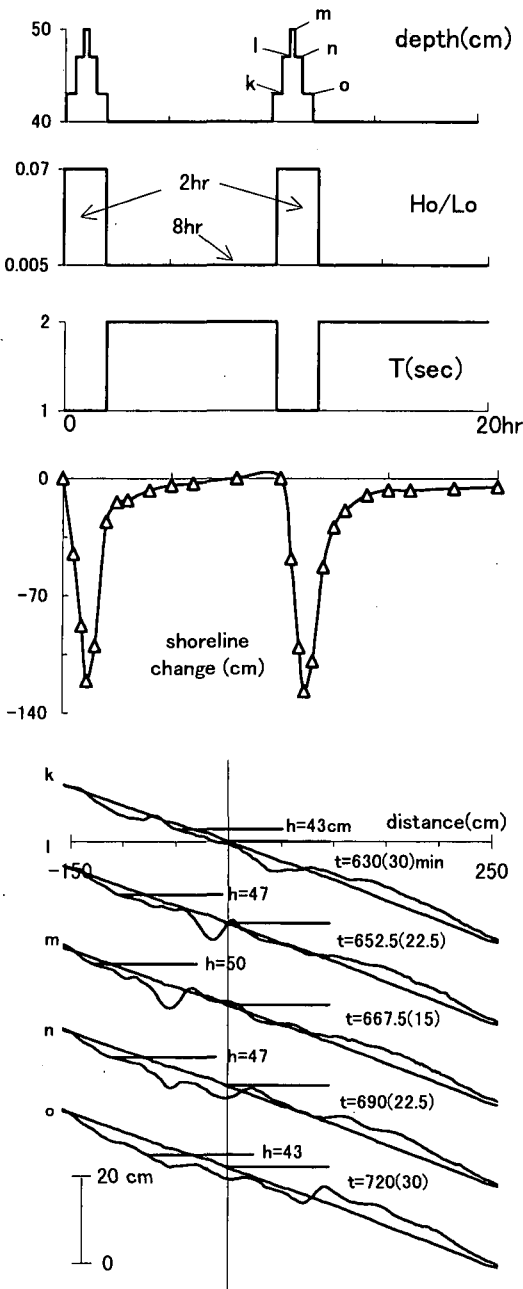


図-3(c) CASE 3 における水位、波浪特性、汀線位置、断面地形の時間変化

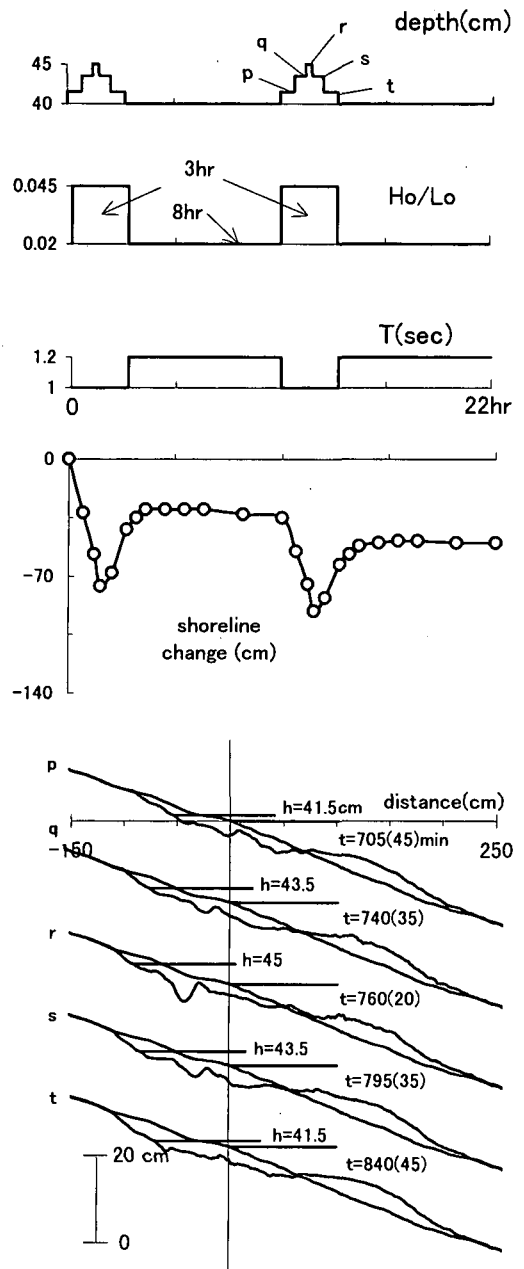


図-3(d) CASE 4 における水位、波浪特性、汀線位置、断面地形の時間変化

クル目の高潮来襲時におけるバーの発生および移動は同じ CASE では同じ傾向を見せ、図-3 の下段には紙面の関係上、各 CASE における 2 サイクル目の高潮来襲時 (図上段の a~t) の断面地形変化を示した。ここで t は実験開始後の経過時間、括弧の中はその水位での波の作用時間を示した。図中 4 段目の汀線の時間変化から高潮作用時における最大水位上昇量 (10 cm) の大きい CASE 1

および 3 の汀線後退量は最大水位上昇量 (5 cm) の小さい CASE 2 および 4 の汀線後退量より大きいが高潮が元に戻った時 (高潮終了時点) では、逆に CASE 2 および 4 の汀線後退量が大きいことがわかる。これは最大水位上昇量は小さいが高潮の作用時間の長い CASE 2 および 4 で侵食がさらに進んだことがその原因と考えられ、高潮作用時における汀線後退量は最大水位上昇量より高潮

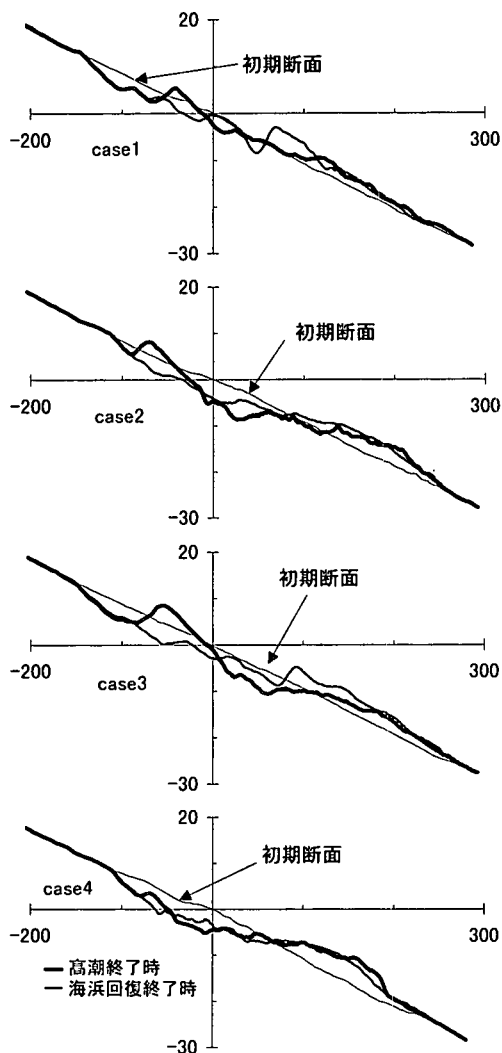


図-4 2サイクルにおける最終断面地形

の作用時間の影響が大きいと考えられる。

次に、2サイクル通じて最も侵食が進んだCASE 4について述べる。図-3(d)下段の断面地形の変化からわかるように、高潮が終了して水位が元に戻った時、顕著なバーが形成されなかったため(1, 2サイクル共に)、平常時に波形勾配 ($H_0/L_0=0.02$) の多少大きい平常時の実験波がバーによって碎波されず Energy を失うことなく入射し、海浜回復がほとんどできなく、式(1)による予測と同じくバームも形成されなかった。続いて2サイクル目の高潮の作用時に、さらに侵食を受けたと考えられる。図-4は各CASEにおける2サイクル目の高潮終了時および2サイクル目の平常の波による海浜回復終了時の最終断面地形を示したものである。

図-3下段の高潮時断面地形変化からCASE 1および3では水位上昇・低下に伴いバーも岸側・沖側へ移動し、

高潮終了時には頂部水深および離岸距離の小さいバーとなった。つぎの平常波浪の時には岸に移動し再びバームになり、比較的安定したビーチサイクルを示している。しかしCASE 2および4では高潮終了時に顕著なバーが形成されず、平常時の正味の岸沖漂砂の限界水深より以深に堆積し、その結果として十分な海浜回復が起こらなかったと考えられる。(図-4参考)一方、図-4から平均水位上昇量が大きいCASE 1および3ではバームより上の前浜上部での侵食が見られることがわかる。

4. 高潮時の汀線後退量算定式

平均水位の上昇・下降を伴う高波浪作用時の汀線変化算定式として平衡断面概念と海浜断面の時間変化を示す式(2)から導いた Kriebel・Dean (1993) の提案式を用いることにする。

$$R(t) = R_{\infty}(1 - e^{-t/T_s}) \dots \dots \dots (2)$$

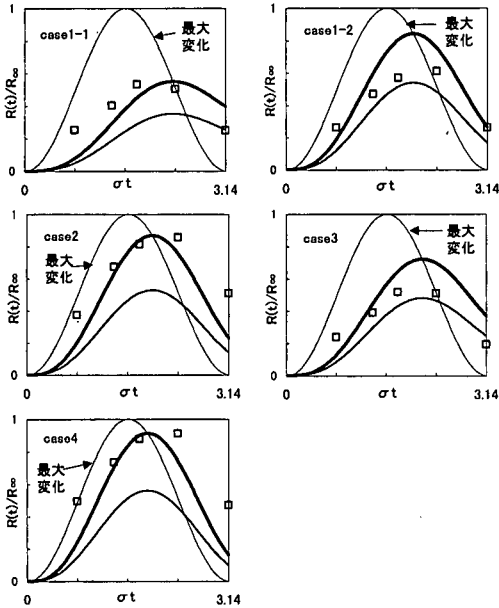
式(2)は一様勾配の初期断面に波を作用させた時、断面地形は指数関数のように変化するという実験結果 (Sunamura・Maruyama, 1987; 出口, 1991) に基づいた式で、ここで、 $R(t)$ は時間 t における海浜断面の変化量、 R_{∞} は平衡断面になった時の海浜断面の最大変化量、 T_s は侵食時間スケールで T_s によって侵食速度が決められる。Kriebel・Dean (1993) はこのような指数関数的断面変形特性と平均水面の変動を現す関数 $f(t)$ を用いて式(3)に示すような水位変動に対する断面変化式を導いた。

$$\frac{dR(t)}{dt} + \frac{1}{T_s} R(t) = \frac{1}{T_s} R_{\infty} f(t) \dots \dots \dots (3)$$

この式は簡単な水面変動関数に対しては解析的に解くことができ、本研究では図-2に示した $\sin$ の二乗の水面変動に対する解析解と本研究で行った段階的の水面変動に対する実験結果を比較した。ここで、 R_{∞} は Bruun (1964) によって提案された幾何学的漂砂量保存法則に基づいて求める。Kriebel・Dean (1993) は R_{∞} を求めるのに漂砂発生限界を碎波帯内としたが、本研究の実験結果から碎波点の沖まで砂が運ばれ、堆積することを考えて佐藤・田中の完全移動限界水深を漂砂量保存法則の適用範囲とし、前浜勾配 m を持つ砂浜に対して式(4)を用いて海浜断面の最大変化量 R_{∞} を計算した。

$$R_{\infty} = \frac{s(x_i - h_i/m)}{B + h_i - s/2} \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 s は最大水位上昇量、 h_i は完全移動限界水深、 x_i は汀線から完全移動限界水深までの岸沖距離、 B はバームの高さである。一方、侵食時間スケール T_s は数値シミュレーションから Kriebel・Dean (1993) が提案した式(5)を用いて計算した。



図—5 高潮における汀線変化

$$T_s = C_1 \frac{H_b^{3/2}}{g^{1/2} A^3} \left(1 + \frac{h_b}{B} + \frac{m x_b}{h_b} \right)^{-1} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 A は底質の平均粒径の関数で平衡断面の勾配を決めるパラメータ (Dean, 1991), h_b は砕波水深, C_1 は定数で 320 である。

図—5 には各 CASE における $\sin$ の二乗の水面変動関数に対する解析解と本研究で行った段階的水面変動に対する実験結果を示した。図中の横軸の σ は π/T_D で T_D は高潮の作用時間である。また、 $\sin$ の二乗関数で示した最大変化は高潮の作用時間が十分長く、平衡断面になった時の断面地形の最大変化量を、太い実線は佐藤・田中 (1962) の完全移動限界水深を用いて計算した R_∞ による解析解を、細い実線は砕波水深を用いて計算した R_0 による解析解を、四角形印は実験による結果を示している。上段の 2 つの図は CASE 1 における作用時間が異なる 1 および 2 サイクル目の高潮に対する変化を示している。この図からも 3 節の実験結果で述べたように高潮作用時間の長い CASE 2・4 の場合が平衡断面に近づき、侵食が進んでいることがわかる。また、本研究で用いた佐藤・田中の完全移動限界水深を用いて計算した R_∞ による解析解が実験値とよく一致することがわかる。

5. 結 論

水位を段階的に変化させた高潮来襲過程とそれに続く平常時の海浜回復過程の再現実験を通じて得られた結論は以下のとおりである。

- 1) 高潮来襲時の汀線後退量は、高潮の最大水位上昇量よりも高潮の持続時間の影響が大きいと考えられる。
- 2) 高潮の最大水位上昇量が多い場合は作用時間によって前浜上部の侵食が起こる可能性がある。
- 3) 高潮時、水位上昇を伴う高波浪による侵食と平常時の波による海浜回復過程は、地形と波との相互作用によって決定される。
- 4) Kriebel・Dean (1993) の式に基づく高潮時の汀線後退量算定式は漂砂発生限界および時間スケールに関する詳細な検討が要るものの、実験結果と定性的に一致した。

参 考 文 献

- 佐藤昭二・田中則男 (1962): 水平床における波による砂移動について, 第 9 回海岸工学講演会論文集, pp. 95-100.
- 武田一郎・砂村継夫 (1982): バームの形成条件と高さ, 地形, Vol. 3, pp. 145-157.
- 武田一郎・砂村継夫 (1984): 砂浜海岸の堆積過程における汀線形状, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 335-339.
- 出口一郎 (1991): 波と漂砂と構造物, pp. 165-169, 1991, 樫木享 編著
- 西陸一郎・佐藤道朗・中村和夫 (1990): 高潮時に生じる海浜侵食と回復過程, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 319-323.
- 堀川清司・砂村継夫・近藤浩右・岡田 滋 (1975): 波による二次元汀線変化に関する一考察, 第 22 回海岸工学講演会論文集, pp. 329-334.
- Bruun, P. (1964): Sea Level Rise as a Cause of Shore Erosion. J. Wtrwys Harb Div, ASCE, Vol. 88, No. 1, pp. 117-130.
- Dean, R. G. (1991): Equilibrium Beach Profiles: Characteristics and Applications, J. Coastal Research, Vol. 7, No. 1, pp. 53-84.
- Kobayashi, N. (1987): Analytical solution for dune erosion by storm, J. Wtrwys, Port, Coast., Oc. Eng., ASCE, 113(4), pp. 401-418.
- Kriebel, D. L. and Dean, R. G. (1985): Numerical simulation of time-dependent beach and dune erosion, Coastal Eng., Vol. 6, pp. 221-245.
- Kriebel, D. L. and Dean, R. G. (1993): Convolution method for time-dependent beach-profile response, J. Wtrwys, Port, Coast., Oc. Eng., ASCE, 119(2), pp. 204-226.
- Sunamura, T. and Maruyama, K. (1987): Wave-induced geomorphic response of eroding beaches—With special reference to seaward migrating bars. Proc. Coastal Sediments, pp. 788-801.